

Modelagem empírica das perdas de água por evaporação e arraste em um sistema mecanizado de irrigação tipo lateral móvel nas condições meteorológicas do sul do Rio Grande do Sul

Emanuele Baifus Manke



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
CENTRO DE DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS HÍDRICOS**



Dissertação

**MODELAGEM EMPÍRICA DAS PERDAS DE ÁGUA POR
EVAPORAÇÃO E ARRASTE EM UM SISTEMA MECANIZADO
DE IRRIGAÇÃO TIPO LATERAL MÓVEL NAS CONDIÇÕES
METEOROLÓGICAS DO SUL DO RIO GRANDE DO SUL**

Emanuele Baifus Manke

Pelotas, 2016.

EMANUELE BAIFUS MANKE

Modelagem empírica das perdas de água por evaporação e arraste em um sistema mecanizado de irrigação tipo lateral móvel nas condições meteorológicas do sul do Rio Grande do Sul

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Recursos Hídricos.

Orientador: Professor Dr. Lessandro Coll Faria

Pelotas, 2016.

Emanuele Baifus Manke

Modelagem empírica das perdas de água por evaporação e arraste em sistemas mecanizados de irrigação tipo lateral móvel nas condições meteorológicas do sul do Rio Grande do Sul

Dissertação aprovada, como requisito parcial, para obtenção de Mestre em Recursos Hídricos, Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas.

Data da defesa: 26 de fevereiro de 2016

Banca examinadora:

Prof. Dr. Lessandro Coll Faria (Orientador)
Doutor em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Lavras (UFLA).

Prof. Dr. Osvaldo Rettore Neto
Doutor em Irrigação e Drenagem pela Escola Superior “Luiz de Queiroz” (ESLQ/USP).

Prof. Dr. Vitor Emanuel Quevedo Tavares
Doutor em Ciência e Tecnologia de Sementes pela Universidade Federal de Pelotas (UFPEl).

Prof. Dr. Samuel Beskow
Doutor em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Lavras (UFLA).

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas
Catalogação na Publicação

M266m Manke, Emanuele Baifus

Modelagem empírica das perdas de água por evaporação e arraste em um sistema mecanizado de irrigação tipo lateral móvel nas condições meteorológicas do sul do Rio Grande do Sul / Emanuele Baifus Manke ; Lessandro Coll Faria, orientador. — Pelotas, 2016.

91 f. : il.

Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, 2016.

1. Irrigação por aspersão. 2. Vento. 3. Arroz. I. Faria, Lessandro Coll, orient. II. Título.

CDD : 627

Dedico este trabalho a minha mãe Neuza e a meu pai Claudimir, pelo amor, apoio, incentivo e ensinamentos.

Ao meu irmão Lucas, e as minhas avós Nelza e Rosa, pelo apoio e carinho.

Agradecimentos

À Deus pela minha existência, motivação nos momentos difíceis e sabedoria para entender as lições da vida.

Ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, pela oportunidade de realização do mestrado.

A Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul, pela concessão das bolsas.

Ao meu orientador Prof. Dr. Lessandro Coll Faria por seus ensinamentos, paciência, confiança e amizade.

Ao Centro de Pesquisa Agropecuária de Clima Temperado, pela disponibilidade de espaço e equipe para a realização dos ensaios de campo.

Ao pesquisador do Centro de Pesquisa Agropecuária de Clima Temperado José Maria Parfitt, pelo apoio e contribuição para realização deste trabalho.

Ao técnico Mikael Bueno e ao funcionário Moacir Rodrigues, do Centro de Pesquisa Agropecuária de Clima Temperado, por operarem o sistema de irrigação deste estudo, permitindo a realização dos ensaios de campo.

Aos colegas de laboratório Maria Chagas Neta, Matheus Simões, Fernando Horbach, Stéfano Boeira, pela grande ajuda na realização dos ensaios de campo, pelo convívio e amizade.

Aos meus colegas de mestrado Bernardo Norenberg e José Henrique Flores, pelo apoio na realização dos ensaios de campo, paciência, incentivo, troca de conhecimentos, convívio e amizade.

As minhas grandes amigas Priscila Priebe, Maria Chagas Neta, Tuane Dutra e Natália Pinheiro, as quais me apoiaram em momentos difíceis durante esta jornada, compartilharam angústias e me incentivaram.

A minha família pelo apoio e compreensão nos momentos de ausência.

Aos componentes da banca, pelas contribuições e discussões no intuito de qualificar ainda mais a minha dissertação.

Por fim, a todos os professores do mestrado, os quais foram fundamentais para minha formação.

Muito Obrigada!

Resumo

MANKE, Emanuele Baifus. **Modelagem empírica das perdas de água por evaporação e arraste em sistemas mecanizados de irrigação tipo lateral móvel nas condições meteorológicas do sul do Rio Grande do Sul**. 2016. 91 f.

Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) – Programa em Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, 2016.

O sistema mecanizado de irrigação do tipo lateral móvel tem capacidade de atingir elevada eficiência de irrigação quando manejado adequadamente, porém, durante a irrigação podem ocorrer perdas de água por evaporação e arraste, as quais são causadas por fatores operacionais e meteorológicos. Desta forma, o objetivo deste trabalho foi avaliar as perdas de água por evaporação e arraste de um sistema mecanizado de irrigação do tipo lateral móvel, em diferentes condições meteorológicas, irrigando a cultura no sul do Rio Grande do Sul. Para tanto, foram realizados ensaios de campo com o sistema lateral móvel de irrigação equipado com aspersores I-Wob, durante o período do dia e em diferentes horários, visando uma maior abrangência das condições meteorológicas. Também foram realizados ensaios de campo somente no segundo e quarto vão do equipamento, visando-se avaliar as perdas dos aspersores instalados a 1,3 e 2,1 m em relação a borda do coletor e as perdas do sistema equipado com os aspersores I-Wob e Super Spray. As perdas foram estimadas por meio de oito diferentes modelos existentes na literatura e comparadas com os dados observados dos ensaios de campo. Os valores das perdas de água por evaporação e arraste do sistema lateral móvel equipado com aspersor I-Wob variaram de 5,86 a 26,75%. As perdas estimadas pelos modelos existentes na literatura, de modo geral, não se ajustaram ou apresentaram pouca adequação em relação aos dados observados de perdas do aspersor I-Wob, sendo que somente o modelo de Yacoubi et al. (2010) apresentou um bom desempenho. A análise das variáveis meteorológicas, permitiu concluir que a velocidade do vento foi explicativa das perdas de água por evaporação e arraste, da região deste estudo. O modelo gerado para estimativa das perdas do equipamento lateral móvel com os dados de velocidade do vento apresentou um ajuste adequado. As perdas por evaporação e arraste médias dos aspersores I-Wob instalados a 1,3 m de altura da borda do coletor foram 12,79% e a 2,1m de altura da borda do coletor foram 13,37%. Na avaliação de diferentes tipos de aspersores, o modelo I-Wob apresentou como resultado perdas médias de 9,0% e o aspersor Super Spray perdas médias de 14,25%. Os valores de perdas estimadas pelos modelos presentes na literatura não apresentaram um ajuste adequado em relação as perdas observadas dos aspersores Super Spray.

Palavras-chave: irrigação por aspersão; vento; arroz

Abstract

MANKE, Emanuele Baifus. **Empirical modeling of evaporation and wind drift losses in lateral move irrigation machines in the meteorological conditions of the South Rio Grande do Sul**. 2016. 91 f. Dissertation (Master Degree em Recursos Hídricos) – Programa em Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, 2016.

The system irrigation type lateral move has capacity of reach high irrigation efficiency when management appropriately, however, during the irrigation can occur wind drift and evaporation losses, which are caused by operating and meteorological factors. Therefore, the objective this paper was evaluate the wind drift and evaporation losses in a mechanized system irrigation type lateral move, in different meteorological conditions, irrigating the rice crop in South Rio Grande do Sul. The field experiments were carried with the system irrigation type lateral move equipped with sprinklers I-Wob, during the day and in different times, aiming a broader range of the meteorological conditions. Also, was carried field experiments just in the second and fourth span of the equipment, aiming evaluate the losses of the sprinklers installed the 1,3 and 2,1m above the catch cans and the losses of system equipped with the sprinklers I-Wob and Super Spray. The losses were estimated through of eight different models existing in the literature and compared with the observed date of the field experiments. The values of the wind drift and evaporation losses the system irrigation type lateral move varied from 5.86 to 26.75%. The losses estimated for the models in the literature, does not adjusted or presented lower adequacy in relation to date observed of losses of the sprinkler I-Wob, but the model of Yacoubi et al. (2010) presented a good performance. The analysis of the meteorological variables, allowed conclude that the wind speed is explanatory of the losses. The model was generated for estimate of the losses with system irrigation type lateral move with the date of wind speed presented adequate adjustment. The medium wind drift and evaporation losses of the sprinklers I-Wob installed the 1.3m above catch cans were 12.79% and the 2.1m above catch cans were 13.37%. In the evaluation of different types of sprinklers, the model I-Wob presented with result average losses of the 9.0% and the sprinkler Super Spray average losses of 14.25%. The values of losses estimated for the models present in the literature does not presented a good adjustment in relation the observed losses of the sprinklers Super Spray.

Key words: sprinkler irrigation; wind; rice

Lista de Figuras

Figura 1 - Estrutura e componentes do experimento utilizado na avaliação da distribuição de água de um único aspersor.	30
Figura 2 - Máquina de irrigação que simula o funcionamento de um sistema de irrigação do tipo pivô central.....	33
Figura 3 - Localização do sistema lateral móvel de irrigação no município do Capão do Leão.	39
Figura 4 - Sistema de irrigação mecanizado lateral móvel instalado na Estação de Terras Baixas.	41
Figura 5 - Aspersor I-Wob instalado no sistema mecanizado de irrigação do tipo lateral móvel.....	41
Figura 6 - Vista lateral do sistema lateral móvel de irrigação, com o detalhe do medidor de pressão LAMON (DMP-01-DPP), emissor de Placa Oscilante (I-WOB) e do coletor.....	42
Figura 7 - Vista superior dos coletores dispostos no campo, nos cinco vãos do sistema lateral móvel.	42
Figura 8 - Sistema lateral móvel de irrigação utilizado na realização do ensaios de campo.....	43
Figura 9 - Estação meteorológica utilizada para o monitoramento das variáveis meteorológicas durante os ensaios.	44
Figura 10 - Aspersor Super Spray instalado no sistema mecanizado de irrigação do tipo lateral móvel.	46
Figura 11 - Vista lateral do sistema lateral móvel de irrigação equipado com aspersores do modelo super spray no segundo vão e I-Wob no quarto vão. O detalhe do medidor de pressão LAMON (DMP-01-DPP) e do coletor.	47
Figura 12 - Vista superior dos coletores dispostos no campo no segundo e no quarto vão do sistema lateral móvel.	47
Figura 13 - Resultados das PEA observadas do aspersor I-Wob em função das PEA estimadas com os modelos presentes na literatura.....	57

Figura 14 - Variáveis meteorológicas e perdas por evaporação e arraste dos experimentos realizados em campo, por meio do sistema de irrigação lateral móvel.	66
Figura 15 - Resultados das perdas por evaporação e arraste observadas para os aspersores instalados a 1,3m versus 2,1m de altura em relação a borda do coletor.....	70
Figura 16 - Resultados das PEA observadas dos aspersores instalados a 1,3m e 2,1m de altura em relação a borda do coletor em função da velocidade do vento.	72
Figura 17 - Resultados das PEA observadas dos aspersores Super Spray versus I-Wob.	74
Figura 18 - Resultados das PEA observadas dos aspersores Super Spray e I-Wob em função da velocidade do vento.	75
Figura 19 - Resultados das PEA observadas do aspersor Super Spray em função das PEA estimadas com os modelos presentes na literatura.	78

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Variáveis que afetam as perdas por evaporação de arraste, de acordo, com diferentes autores.....	29
Tabela 2 - Modelos empíricos propostos por pesquisadores para determinação das perdas por evaporação e arraste.....	50
Tabela 3 - Análise de desempenho com base no índice de confiança de desempenho (CAMARGO e SENTELHAS, 1997).	52
Tabela 4 - Resultados das perdas por evaporação e arraste e variáveis meteorológicas monitoradas durante os ensaios de campo.....	54
Tabela 5 - Resultados do teste estatístico t de Student para cada variável meteorológica monitorada em função das perdas por evaporação e arraste.	66
Tabela 6 - Resultados das perdas por evaporação e arraste dos aspersores instalados a 1,3m e 2,1m em relação a borda do aspersor, e variáveis meteorológicas monitoradas durante a realização dos ensaios de campo.....	69
Tabela 7 - Resultados do teste estatístico Tukey aplicado entre as perdas por evaporação e arraste dos aspersores instalados a 1,3 e 2,1m de altura em relação a borda do coletor.....	71
Tabela 8 - Resultados das perdas por evaporação e arraste dos aspersores I-Wob e Super Spray e das variáveis meteorológicas monitoradas durante os ensaios de campo.	73
Tabela 9 - Resultados do teste estatístico Tukey aplicado entre as perdas por evaporação e arraste dos aspersores Super Spray e I-Wob.....	75

Sumário

1 Introdução	15
2 Revisão Bibliográfica	17
2.1 Irrigação	17
2.2 Arroz irrigado por aspersão	18
2.3 Sistema mecanizado de irrigação por aspersão tipo lateral móvel	20
2.4 Aspersores	21
2.5 Ensaios de campo	23
2.6 Perdas por evaporação e arraste	25
2.7 Estimativa e modelagem das perdas por evaporação e arraste	30
2.7.1 Faci et al. (2001)	30
2.7.2 Dechmi et al. (2003a)	31
2.7.3 Playán et al. (2004)	32
2.7.4 Playán et al. (2005)	34
2.7.5 Ortiz et al. (2009)	35
2.7.6 Yacoubi et al. (2010)	36
2.7.7 Sanchez et al. (2011)	37
2.7.8 Colombo et al. (2015)	38
3 Material e métodos	39
3.1 Caracterização da área de estudo	39
3.2 Ensaios de campo	40
3.2.1 Sistema lateral móvel de irrigação	40
3.2.2 Sistema lateral móvel de irrigação com aspersores I-Wob instalados a diferentes alturas	44
3.2.3 Sistema lateral móvel de irrigação equipado com diferentes tipos de aspersores	45

4.5 Processamento de dados	48
4.5.1 Estimativa das perdas por evaporação e arraste.....	48
4.5.2 Estimativa das perdas por evaporação e arraste por diferentes modelos .	50
4.5.3 Modelagem das perdas por evaporação e arraste do sistema lateral móvel de irrigação.....	52
4.5.4 Modelagem das perdas por evaporação e arraste do sistema lateral móvel de irrigação equipado com aspersores instalados a diferentes alturas	52
4.5.5 Modelagem das perdas por evaporação e arraste do sistema lateral móvel equipado com diferentes tipos de aspersores	53
5 Resultados e Discussão	54
5.1 Perdas de água por evaporação e arraste do sistema lateral móvel de irrigação	54
5.2 Perdas por evaporação e arraste estimadas por diferentes modelos	56
5.3 Variáveis meteorológicas	65
5.4 Modelo proposto para estimativa das perdas por evaporação e arraste do sistema lateral móvel de irrigação.....	68
5.5 Perdas por evaporação e arraste do sistema lateral móvel de irrigação equipado com aspersores instalados a diferentes alturas	69
5.6 Perdas por evaporação e arraste do sistema lateral móvel de irrigação equipado com diferentes tipos de aspersores.....	73
5.7 Perdas por evaporação e arraste do sistema lateral móvel equipado com aspersores Super Spray	77
5.8 Modelo proposto para o sistema lateral de irrigação equipado com aspersores Super Spray	83
6 Conclusões.....	84
Referências	85

1 Introdução

O crescimento populacional ao longo dos anos implica no aumento da demanda por alimentos, sendo assim, é indispensável uma produção agrícola eficiente que permita o suprimento desta. Neste contexto, a irrigação é uma técnica imprescindível para produção de alimentos com elevados índices de produtividade e maior qualidade de produtos agrícolas.

No sul do Rio Grande do Sul, a principal atividade agrícola desenvolvida é o cultivo do arroz, o qual é tradicionalmente irrigado pelo sistema de irrigação por inundação, que, entre os sistemas existentes, é o que demanda uma maior quantidade de água. No entanto, considerando a necessidade da minimização do consumo de água nos diferentes setores produtivos, os sistemas pressurizados de irrigação, como pivô central e lateral móvel, estão sendo avaliados por pesquisadores, como alternativa para irrigação da cultura do arroz, visando à redução do volume de água utilizado. Essas pesquisas têm como objetivo verificar a produtividade do arroz irrigado por aspersão, através de sistemas do tipo pivô central e lateral móvel, porém, pouco se conhece sobre a engenharia destes sistemas quando utilizados na irrigação da cultura do arroz.

A irrigação por aspersão permite a aplicação de água de forma similar à chuva, na quantidade ideal e no momento certo. O equipamento lateral móvel de irrigação é um dos sistemas por aspersão, o qual pode atingir elevados índices de uniformidade e eficiência quando manejado adequadamente. No entanto, as diferentes condições meteorológicas de cada região, podem influenciar a operação destes. Desta forma, o desempenho destes sistemas, nas condições meteorológicas onde estão instalados, deve ser conhecido por projetistas e irrigantes, visando-se minimizar as perdas durante a irrigação.

As perdas por evaporação e arraste (PEA) em sistemas pressurizados de irrigação podem ser causadas por fatores operacionais e meteorológicos. Em relação aos fatores operacionais, as perdas podem ser afetadas, por exemplo, pela altura de instalação do aspersor, pois quanto mais distante o aspersor estiver da superfície, maior será o trajeto da gota até o solo e mais suscetível estará à ação do vento, consequentemente, as perdas por arraste poderão ser maiores. Além disso, o

diâmetro do bocal, o modelo de aspersor e a pressão do sistema também podem influenciar as perdas durante a irrigação.

Em relação aos fatores meteorológicos, as perdas de água podem ser acarretadas principalmente pelas altas velocidades do vento, as quais podem causar o arraste das gotas aspergidas para fora da área de irrigação. Além disso, podem ocorrer devido à evaporação das gotas durante o seu percurso, a qual e, em alguns casos, é influenciada por outras variáveis, como, a umidade relativa do ar e a temperatura.

A avaliação das perdas é realizada por meio de testes de campo, os quais normalmente demandam tempo e mão de obra. No entanto, com a possibilidade de proporcionar a redução da realização de testes de campo, para avaliação de equipamentos em algumas regiões específicas, alguns pesquisadores vêm desenvolvendo modelos para estimativa das PEA, os quais consideram as condições meteorológicas de cada região e também as características de cada equipamento. Estes modelos, apesar de facilitarem a determinação das perdas, muitas vezes não podem ser generalizados para qualquer região do mundo e também para qualquer sistema de irrigação por aspersão, devido as suas particularidades.

Desta forma, o principal objetivo deste trabalho foi avaliar as perdas de água por evaporação e arraste de um sistema mecanizado de irrigação do tipo lateral móvel, operando em diferentes condições meteorológicas, irrigando a cultura de arroz no sul do Rio Grande do Sul. Além disso, objetivou-se especificamente: i) verificar a influência dos fatores meteorológicos (temperatura e umidade relativa do ar, velocidade do vento) nas perdas por evaporação e arraste de um sistema mecanizado de irrigação por aspersão do tipo lateral móvel; ii) Avaliar as perdas de água por evaporação e arraste do sistema mecanizado de irrigação do tipo lateral móvel equipado com emissores de placa oscilante, dispostos a duas diferentes alturas da superfície do solo; iii) Estimar as perdas por evaporação e arraste do sistema de irrigação equipado com aspersores de spray placa fixa e comparar com as perdas obtidas pelos aspersores de placa oscilante; iv) verificar se os modelos existentes na literatura propostos por FACI et al. (2001), PLAYÁN et al. (2004), PLAYÁN et al. (2005), ORTÍZ et al. (2009), YACOUBI et al. (2010), SANCHEZ et al. (2011) e COLOMBO et al. (2015) podem ser aplicados às condições meteorológicas do Rio

Grande do Sul, para a determinação das perdas por evaporação e arraste do equipamento; v) ajustar um modelo para determinação das perdas de água por evaporação e arraste para sistemas mecanizados de irrigação do tipo lateral móvel para as condições meteorológicas do Rio Grande do Sul.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Irrigação

As mudanças climáticas ocorridas ao longo dos anos são um dos maiores desafios ambientais do século XXI. Há possibilidade de ocorrência de danos irreversíveis aos ecossistemas terrestres e a água, podendo consequentemente causar reduções no potencial de produção agrícola, desafiando pesquisadores das mais diversas áreas do conhecimento (CUNHA et al., 2013). Desta forma, a disponibilidade e distribuição da água requerem cuidados urgentes e permanentes, considerando a situação atual dos recursos hídricos, o que leva o homem a planejar e racionalizar o uso da mesma para os diversos fins (OLIVEIRA et al., 2003).

No Brasil, há algumas regiões com elevado déficit hídrico ou precipitações irregulares, onde a irrigação é um fator tecnológico imprescindível para a produção agrícola (BESKOW et al., 2011). No entanto, de modo geral, verifica-se que a agricultura irrigada tem alcançado expressividade no setor produtivo no âmbito mundial, tornando-se fundamental à utilização de equipamentos de irrigação e técnicas de manejo que propiciem a economia de água e energia (OLIVEIRA et al., 2013).

Os produtores agrícolas, na maioria das vezes, reconhecem a necessidade de controlar a quantidade de sementes, adubação, defensivos agrícolas, dentre outros insumos. Entretanto, a necessidade de medir ou controlar o volume de água aplicada na irrigação é quase sempre ignorado, pois é um fator que não influencia significativamente na redução dos custos de produção, ou porque a cobrança pelo uso dos recursos hídricos ainda não está implantada na maior parte do país ou mesmo por tradição (SANDRI; CORTEZ, 2009).

Cunha et al. (2013) realizaram um estudo, no qual verificaram que os agricultores obtêm maiores retornos financeiros através da produção de sequeiro, pois

os sistemas de irrigação apresentam um elevado custo de implantação, o que faz com que a produção agrícola se torne menos rentável. Os autores afirmaram que em geral os agricultores não se preocupam com o manejo da água, e nem com as condições que são necessárias para que se tenha uma produção eficiente em relação à disponibilidade de água. Ainda segundo os mesmos, considerando os cenários futuros de mudanças climáticas esse resultado se inverte, ou seja, os agricultores que utilizarem sistemas de irrigação, alcançaram maiores retornos a médio e longo prazo. Todavia, é necessária à adoção de políticas públicas que incentivem os agricultores a utilizarem sistemas de irrigação, os quais proporcionem uma elevada produção e ao mesmo tempo eficiente.

No entanto, para que se tenha economia de água e energia é necessário que o desempenho dos sistemas de irrigação sejam aperfeiçoados. Além disso, são imprescindíveis avanços no processo de gestão e planejamento da irrigação, e otimização da aplicação de água (TARJUELO et al., 1992).

2.2 Arroz irrigado por aspersão

No estado do Rio Grande do Sul (RS) a ocorrência de estiagem na época de cultivo de arroz tem sido frequente nos últimos anos, causando muitos problemas para irrigação em todo estado, devido à alta necessidade de água no sistema de irrigação inundado. As projeções regionais mostram que o RS deve continuar liderando a produção de arroz no Brasil nos próximos anos. A produção do estado que representou em 2012/2013, 66,5% da produção nacional de arroz, e deve aumentar nos próximos anos em 17,7% e a área em 11,8%. Apesar da importância econômica que tem para o estado, o setor agrícola tem enfrentado problemas em relação à escassez hídrica. Assim, a irrigação por aspersão pode ser muito promissora para a orizicultura, por ser um sistema mais eficiente, comparado ao tradicional sistema de irrigação por inundação (MAPA, 2013; GIACOMELI et al., 2013).

De acordo Conceço et al. (2009), pesquisas iniciais apontam uma economia de água ao redor de 40,0 a 50,0% para o cultivo de arroz irrigado por aspersão, em comparação ao sistema inundado.

As vantagens da irrigação por aspersão na cultura do arroz estão na possibilidade de utilizar um sistema de maior eficiência mantendo os mesmos índices de produtividade. Esta produtividade é expressa em função da interação do genótipo com o ambiente da região onde este é cultivado (BARBOSA et al., 2013).

O cultivo de arroz irrigado por aspersão também reduz a necessidade de movimentação do solo, devido à possibilidade de fazer o plantio direto na palha, através de rotação de culturas com pastagens ou outras culturas de inverno. Além da redução da movimentação do solo, este sistema pode facilitar o uso de técnicas de recuperação de solos como a utilização na entressafra de plantas com forte sistema radicular e de adubação verde. (GIACOMELI et al., 2013).

Os resultados obtidos por Parfitt et al. (2013) no ano agrícola de 2012/2013 confirmaram que a produção de arroz irrigado por aspersão tem potencial de produção elevado, mas para isto as técnicas aplicadas a este sistema de cultivo devem ser corretamente utilizadas. O uso de cobertura do solo com nabo forrageiro, no inverno, potencializa a produção do arroz, em mais de 2T ha⁻¹ ($\pm 7400\text{kg ha}^{-1}$). Desta forma, segundo os mesmos, a cultura do arroz quando irrigada por aspersão é afetada pelo sistema de produção onde se insere. O sistema de produção com arroz em rotação e uso de cobertura no inverno, de nabo forrageiro antes do arroz, foi o sistema mais favorável para a produtividade de grãos de arroz.

Um experimento realizado por Kahlown et al. (2007) durante os anos de 2002 a 2004 na bacia hidrográfica Indus, localizada no Paquistão, avaliou a eficiência do uso da água e viabilidade econômica do sistema de irrigação por aspersão no cultivo do arroz e do trigo. Além disso, os autores também verificaram o rendimento destas culturas quando irrigadas pelo sistema de irrigação por inundação.

Kahlown et al. (2007) encontraram como resultado uma maior eficiência de uso da água da irrigação por aspersão, sendo que dependendo da cultura e das condições sazonais, a quantidade de água utilizada pode ser 26,0% menor do que a irrigação por sulcos. No entanto, a adoção em larga escala do sistema de irrigação por aspersão nas áreas irrigadas da bacia do Indus não é esperada em um futuro próximo, devido ao fato do baixo valor econômico da água.

Desta forma, verifica-se que o método de irrigação por aspersão vem ao longo dos anos sendo adotado como uma alternativa promissora dentro do sistema

produtivo da cultura do arroz. No entanto, ainda há carência de pesquisas sobre as necessidades hídricas reais da cultura do arroz quando irrigada por aspersão (AMBUS et al., 2013; CONCENÇO et al., 2009).

2.3 Sistema mecanizado de irrigação por aspersão tipo lateral móvel

A irrigação por aspersão consiste de um método em que um jato de água em alta velocidade se difunde no ar em um conjunto de gotas, distribuindo-se ao longo da superfície do solo, com o objetivo de atingir uma distribuição uniforme entre os aspersores (TARJUELO, 2005).

Os sistemas de irrigação por aspersão podem ser divididos em dois grupos básicos: os que operam com os aspersores em uma posição fixa definida e os sistemas que funcionam enquanto os aspersores estão em movimento através do campo, chamados de mecanizados (KELLER & BLIESNER, 1990).

No Brasil, os sistemas de irrigação por aspersão mecanizados mais utilizados são os do tipo pivô central, porém aos poucos cresce também o número de equipamentos do tipo lateral móvel em operação (CHRISTOFIDIS, 2006).

O sistema mecanizado de irrigação lateral móvel é, de acordo com a NBR 14244/1998, um equipamento de irrigação automatizado, constituído de uma linha de emissores, sustentado por uma ou mais torres autopropelidas. A unidade move-se em linha reta ou em uma curvatura suave, irrigando basicamente uma faixa retangular. A água pode ser suprida ao equipamento em qualquer ponto ao longo da tubulação (canal aberto ou mangueira) e depois é conduzida aos emissores dispostos na tubulação. O conjunto de emissores dimensionados, para utilização nas saídas da tubulação aérea, podem ser fixos (spray) ou rotativos (aspersores de impacto, reativos ou vibratórios), podendo incluir pendurais, bengalas, extensões de tubulações, reguladores de pressão ou fluxo, e estruturas de suporte, projetados para uma máquina específica em uma determinada condição de operação (ABNT, 1998).

No sistema lateral móvel o deslocamento do equipamento ocorre de forma frontal e todas as torres movem-se ao mesmo tempo, há melhor eficiência e uniformidade de aplicação de água em comparação ao pivô central. Isso porque os bocais dos emissores são praticamente os mesmos ao longo do equipamento, proporcionando uma aplicação de água bem próxima da requerida, evitando, assim, alta intensidade de aplicação no final da linha (MANTOVANI et al., 2005). Além disso, de acordo com Keller e Bliesner (1990), a distribuição de água obtida a partir desses

sistemas tem resultado em elevados coeficientes de uniformidade (CUC) mesmo sob condições de vento.

De modo geral, o sistema de irrigação por aspersão deve ser avaliado após a implantação do projeto, visando verificar se o seu desempenho está de acordo com o que foi preestabelecido, possibilitando, se necessário, a realização de ajustes para melhorar a sua performance, e periodicamente, com o objetivo de avaliar a qualidade da manutenção e do manejo do sistema (ROCHA et al., 1999).

A avaliação do sistema de irrigação tem como objetivo determinar a eficiência do mesmo, a uniformidade de aplicação de água e a sua adequação, juntamente com outros indicadores de desempenho. O desempenho do sistema deve ser avaliado nas condições de operação de campo reais, para que os parâmetros que indicam a qualidade de performance do mesmo sejam determinados de forma adequada (LATIF e AHMAD, 2008).

De acordo HEERMANN et al. (1992) quando aplica-se uma quantidade de água inferior à necessária pode-se causar estresse hídrico à planta e quando disbonibiliza-se água em excesso, pode ocorrer a lixiviação do solo, contribuindo para poluição das águas subterrâneas. Desta forma, é necessário o manejo adequado da irrigação para obter-se uma produção eficiente, proporcionando a economia de água, energia e também de insumos agrícolas.

O adequado manejo da irrigação requer o conhecimento das propriedades do solo e da água, das necessidades hídricas das culturas e das condições meteorologias. Em sistemas de irrigação por aspersão, o manejo pode ser efetivamente usado pelos agricultores, uma vez que a lâmina de irrigação pode ser ajustada. Além disso, algumas técnicas podem ser adotadas para estabelecer estratégias de gestão que conduzem a uma minimização da utilização de água (DECHMI et al., 2003b).

2.4 Aspersores

Os aspersores são peças fundamentais dos sistemas de irrigação por aspersão. Os mesmos operam sob pressão e lançam o jato de água no ar, o qual é

fracionado em gotas, caindo sobre o solo em forma de chuva (BERNARDO et al., 2006).

Na irrigação por aspersão existem três modelos de aplicação de água que se diferenciam em: tipo de emissor, sua disposição ao longo da lateral e diâmetro de alcance de cada emissor (TARJUELO, 2005). Os aspersores podem ser basicamente: de impacto, spray e rotativos (ANDRADE, 2008).

Em relação à forma de funcionamento, nos aspersores do tipo spray a água sai por um orifício vertical e atinge uma placa que pode ser fixa, girar, ser lisa ou ranhurada. Esse tipo de aspersor opera com pressões entre 70kPa e 200kPa e apresenta um alcance menor que os de impacto e, por isso, irrigam com uma taxa de aplicação elevada. As placas ranhuradas móveis do tipo wobbler propiciam a emissão de gotas maiores e maior raio de alcance, o que reduz um pouco a taxa de aplicação e minimiza potenciais problemas de escoamento superficial no final de laterais de pivôs centrais, instalados em solos com baixa intensidade de infiltração. Estes aspersores são muito empregados em pivôs centrais e sistemas laterais móveis, por permitirem menor consumo de energia e por operarem com uma pressão mais baixa, os sprays sofrem mais o efeito das variações de pressão oriundas das inclinações do terreno e da perda de carga nas laterais e, por isso, quase sempre, requerem a utilização de reguladores de pressão (ALBUQUERQUE, 2008).

Tarjuelo (2005) afirmam que para alcançar um equilíbrio entre as PEA e a uniformidade de irrigação os aspersores devem ser posicionados a 2,0m da superfície do solo (com exceção dos aspersores de impacto), gerando uma área molhada em torno de 12 a 15m, requerendo uma pressão de operação de 150 a 200kPa. Nestas condições é recomendado um espaçamento de 2,5 a 3,0m entre aspersores, não podendo ultrapassar 5,0 a 7,0m para aspersores de maior alcance como os rotativos.

Dukes et al. (2006) compararam o aspersor I-Wob com o aspersor spray placa fixa com ranhuras através de experimentos, estes verificaram que operando com reguladores de pressão em cada aspersor e com variação da velocidade do vento, os aspersores I-Wob apresentaram um coeficiente de uniformidade 10,0% maior do que os aspersores spray placa fixa com ranhuras. No entanto, em condições de alta velocidade do vento ambos os aspersores apresentaram coeficientes de uniformidade similares (DUKES et al., 2006).

Os aspersores spray placa fixa também foram avaliados por Clark et al. (2003) através de experimentos realizados em laboratório e em campo, os autores determinaram o coeficiente de uniformidade (CUC) destes aspersores em condições de baixa velocidade do vento. Os resultados do CUC variaram de 72,0 a 99,0% e tenderam a diminuir com o aumento do espaçamento entre aspersores e diminuição

da pressão. Além disso, os mesmos afirmam que para obter um bom resultado de uniformidade de aplicação de água é indicado que espaçamento entre os aspersores fique entre a faixa de 2,5 a 3,0m e a pressão de operação deve exceder 70kPa, porém, ainda de acordo com os autores, as PEA podem ser maiores para elevados valores de pressão.

Neste mesmo sentido, a uniformidade de aplicação de água dos aspersores spray placa fixa foi comparada com aspersores spray placa oscilante por Faci et al. (2001), a avaliação foi feita através de ensaios de campo para diferentes diâmetros de bocais, alturas de aspersores, velocidade e direção do vento. Os autores verificaram que para um espaçamento de 3,0m ambos os aspersores apresentam elevados valores de uniformidade. Já para um espaçamento de 5,0m, os resultados de CUC para os aspersores spray placa fixa foram menores do que para os aspersores spray placa oscilante. Em relação às PEA os mesmos encontraram um melhor relacionamento entre o aspersor spray placa oscilante e a velocidade do vento, do que os aspersores spray placa fixa.

Em relação as PEA dos aspersores spray placa rotativa e spray placa fixa, Ortíz et al. (2009) avaliaram e concluíram que as perdas durante a irrigação diurna foram aproximadamente 10,0% menores para os aspersores do tipo rotativos do que para os aspersores spray placa fixa, sendo ainda, 25,0% menores durante a irrigação noturna.

Playán et al. (2004) também verificaram experimentalmente os aspersores spray placa rotativa e I-Wob, os autores não encontraram diferenças significativas entre os resultados das PEA. Entretanto, em relação ao CUC os aspersores do tipo spray placa fixa apresentaram um resultado de 76,6%, sendo este valor menor, quando comparado com os aspersores spray placa rotativa e I-Wob que apresentaram respectivamente 94,4 e 92,7%.

2.5 Ensaios de campo

No Brasil os ensaios devem seguir o recomendado pela NBR 14244/1998. Além desta, existem outras normas internacionais de ensaios de campo para avaliação de

sistemas mecanizados de irrigação do tipo lateral móvel, como a norma *ASAE Standards* (2001) e a norma ISO 11545:2001.

A NBR 14244/1998 especifica que para a realização dos ensaios os coletores instalados no campo devem ser idênticos, e a borda dos mesmos deve ser simétrica e sem depressões. A altura dos coletores deve ser pelo menos 80mm e o diâmetro de entrada deve ser a metade ou uma vez a altura, porém não menos que 60mm. O espaçamento entre os mesmos dentro de cada linha não deve ser maior do que 5,0m para emissores do tipo rotativo e devem ser dispostos de maneira que as obstruções do tipo de dossel das plantas não interfiram na aplicação de água. A *ASAE Standards* (2001) apresenta praticamente as mesmas recomendações que a NBR 14244/1998, porém em relação aos coletores afirma que a altura destes no campo não deve ser inferior a 120mm.

De acordo com a NBR 14244/1998 e a *ASAE Standards* (2001), o ensaio deve ser conduzido em períodos do dia que minimizem os efeitos da evaporação, tais como período noturno ou nas primeiras horas da manhã. E o volume de água em cada coletor deve ser medido e registrado tão logo esteja fora o alcance dos jatos de água, visando minimizar os efeitos da evaporação que ocorre durante o ensaio.

A velocidade e direção do vento devem ser mensuradas durante a realização dos experimentos. O equipamento para medição de velocidade do vento deve estar posicionado a uma altura de 2m da superfície do solo e a uma distância de 200m do local de ensaio (ABNT,1988; *ASAE Standards*, 2001).

O ensaio não deve ser utilizado para avaliar a uniformidade ou desempenho do conjunto de emissores, se a velocidade do vento exceder 3m s^{-1} . Para o ensaio de um equipamento em velocidade do vento maior do que 3m s^{-1} , deve-se compreender as limitações dos resultados do ensaio (ABNT,1998; ISO, 2001). Em contrapartida, a *ASAE Standards* (2001) afirma que somente se a velocidade do vento exceder 5m s^{-1} , que os resultados dos ensaios de uniformidade ou o desempenho dos emissores, podem não ser válidos. Desta forma, verifica-se que a *ASAE Standards* (2001) estabelece um limite de velocidade do vento para a realização dos ensaios superior ao estabelecido pela NBR 14244/1998 e norma ISO 11545:2001.

A NBR 14244/1998 recomenda também que a velocidade e direção dos ventos predominantes durante o tempo de ensaio devem ser medidas e registradas em intervalos de tempo inferiores a 15min.

A pressão no ponto inicial da tubulação e em pontos intermediários deve ser registrada. A medição da pressão no final da linha não é obrigatória, porém pode facilitar a localização de problemas hidráulicos no equipamento (ABNT,1998).

Por fim, o equipamento deve ser operado de modo que velocidade e tempo de deslocamento permitam que o equipamento aplique até o fim do ensaio uma lâmina de água de no mínimo 15mm (ABNT,1988; *ASAE Standards*, 2001).

2.6 Perdas por evaporação e arraste

Na irrigação por aspersão a água aspergida desloca-se através do ar em direção ao dossel da cultura ou da superfície do solo. No entanto, uma parte da água aplicada pelo sistema não atinge a superfície irrigada, esta água não é contabilizada e é conhecida como “perda por evaporação e arraste” (MCLEAN et al., 2000; PLAYÁN et al., 2005; STAMBOULLI et al., 2013).

Quantificar as PEA é de grande importância, tanto no aspecto econômico quanto no ambiental, possibilitando a minimização das mesmas em sistemas de irrigação por aspersão, porém estimar separadamente as PEA é uma tarefa bastante complexa, em virtude das dificuldades encontradas com as técnicas necessárias para medir tais perdas (BESKOW et al., 2011).

As interações dos fatores que afetam o caminho aéreo das gotas que causam as perdas (entre os quais se destacam a dimensão da gota, temperatura do ar, atrito com o ar, umidade relativa do ar, radiação solar, velocidade do vento), tornam difícil a descrição e avaliação do fenômeno (WRACHIEN e LORENZINI, 2006). Desta forma, vários autores avaliam sistemas de irrigação com o objetivo de identificar as variáveis meteorológicas que influenciam as PEA (PLAYÁN et al., 2005).

De modo geral, a determinação das PEA é feita através da diferença da lâmina média aplicada e da lâmina média coleta (TOPAK et al., 2005). No entanto, para isto, primeiramente é necessário a realização de experimentos que consistem na inserção de coletores de água no ambiente a ser irrigado e em seguida a aplicação de água

através do sistema de irrigação sobre os mesmos. Após a irrigação, a lâmina coletada é mensurada e é verificada a diferença entre as lâminas aplicada e coletada. Este método para estimativa das perdas atualmente é o mais utilizado pela maioria dos pesquisadores, como Playán et al. (2005), Sanchez et al. (2011), entre outros.

A perda de água por evaporação durante a irrigação em alguns estudos (YAZAR, 1984; GEORGE, 1955) foi determinada através da metodologia que considera a condutividade elétrica da água. O método da condutividade elétrica baseia-se na premissa de que qualquer perda ou ganho de água na gota que viaja através do ar, causará uma mudança correspondente na sua concentração de soluto, e consequentemente na condutividade elétrica. As gotas durante o seu deslocamento até a superfície do solo sofrem perdas por evaporação, o que faz com que aumente a concentração de solutos nas mesmas e consequentemente a condutividade elétrica das gotas (YAZAR, 1984; GEORGE, 1955; McLEAN et al., 2000).

No método da condutividade elétrica, também são instalados coletores no local onde são realizados os experimentos. No entanto, para a determinação das perdas por evaporação, neste método, primeiramente é mensurada a condutividade elétrica na fonte de onde é captada a água e após é verificada a condutividade da água no coletor. A diferença entre as duas condutividades dividida pela condutividade medida no coletor multiplicado por cem, representa o total de água evaporado (YAZAR, 1984; GEORGE, 1955; McLEAN et al., 2000).

A magnitude das PEA depende das condições meteorológicas e operacionais. Para obter-se uma visão sobre a proporção dessas perdas, é importante conhecer primeiramente os fatores que as afetam. A partir da determinação dessas relações, as condições para operação dos sistemas de irrigação por aspersão podem ser definidas e o equipamento pode ser projetado (YAZAR, 1984).

Na irrigação por aspersão as PEA são afetadas, de acordo com Tarjuelo et al. (2000), por um grande número de fatores de forma direta (tamanho das gotas, condições meteorológicas, entre outros fatores) e também indiretamente (devido à pressão de operação, diâmetro do bocal, etc.). Neste mesmo contexto, mais especificamente, as perdas que são causadas por arraste dependem da altura do aspersor em relação à superfície do solo, da pressão de saída do mesmo, do diâmetro das gotas, e da velocidade e direção do vento. Já as perdas por evaporação são

afetadas tanto pela velocidade do vento, quanto por outras variáveis meteorológicas, como temperatura do ar, déficit de pressão de vapor, umidade relativa do ar, entre outros. (ORTÍZ et al., 2009; McLEAN et al., 2000).

Em relação aos fatores operacionais, a altura do aspersor influencia as perdas de modo que quanto mais elevado estiver o aspersor maior será a trajetória das gotas até a superfície do solo, aumentando o tempo de contato com o ar e assim a suscetibilidade a fatores meteorológicos. Desta forma, a redução da altura do emissor em relação à cultura é uma das técnicas para redução das perdas (HEINEMMAN et al., 1998; PLAYÁN et al., 2005). Ortiz et al. (2009) constataram em seu trabalho que as perdas durante o dia podem ser reduzidas em cerca de 33,0%, quando o mesmo tipo de aspersor é fixado 1m acima da superfície do solo ao invés 2,5m. Em condições de irrigação à noite estas reduções são cerca de 45,0%.

Além disso, na irrigação por aspersão as gotas maiores são mais resistentes à deriva e apresentam menor área por unidade de massa, como consequência, são menos afetadas pelas PEA (PLAYÁN et al., 2005). Neste sentido, Montero et al. (2003) mensuraram o diâmetro das gotas de aspersores através de um espectro pluviômetro óptico e verificaram que a pressão de operação foi o principal fator a influenciar a distribuição e o tamanho das gotas, ainda segundo os autores, quando a pressão de operação do aspersor foi reduzida, o tamanho das gotas aspergidas foi em geral maior.

Os resultados do estudo de Toromo et al. (2011) também indicaram que os tamanhos das gotas geradas pelos aspersores dependem principalmente da pressão de operação do aspersor e não do diâmetro do bocal. Desta forma, percebe-se que os aspersores de baixa pressão, os quais geram gotas maiores são mais resistentes ao arraste do vento e consequentemente são mais indicados para regiões ventosas (TOROMO et al., 2011).

No âmbito das condições meteorológicas, de acordo com Dechmi et al. (2003b), no Vale do Ebro na Espanha, o vento é o principal fator que afeta o desempenho da irrigação por aspersão. Desta forma, nesta região a gestão de irrigação por aspersão é primeiramente determinada pelo vento. Desta forma, os agricultores concentram as operações de irrigação em dias calmos com o objetivo de conservar a água e manter um nível aceitável de uniformidade. Quando as condições de vento prevalecem, os

agricultores acabam sendo forçados a irrigar sob condições de vento moderadas a altas, e portanto, aceitar um mau desempenho e um menor potencial de rendimento.

Já o estudo realizado por Latif e Ahmad (2008) em um campo de golfe no Paquistão, as perdas durante os experimentos foram causadas de forma significativa pela temperatura e umidade relativa do ar, do que pela velocidade do vento, pois na maioria dos ensaios de campo a velocidade do vento foi classificada como calma e em alguns casos como sem velocidade. De modo geral, segundo os autores para minimizar as perdas no Paquistão o sistema deve ser operado quando a umidade relativa do ambiente estiver alta, e a temperatura do ar e velocidade do vento estiverem baixas.

Alnaizy e Simonet (2012), realizaram experimentos em duas regiões dos Emirados Árabes, e verificaram que em Sharjah, com uma elevada temperatura, porém umidade relativa alta as perdas por evaporação não foram muito altas. Entretanto, na região de Riyadh com a temperatura elevada, porém com baixa umidade relativa do ar as perdas foram maiores.

Ainda em relação às condições meteorológicas, na maioria das pesquisas realizadas atualmente foi constatado que em algumas regiões a irrigação durante o período da noite proporciona uma menor perda por evaporação e arraste, pois os fatores meteorológicos que afetam as perdas são mais leves durante o turno da noite (Playán et al., 2005). No Vale do Ebro na Espanha, Playán et al. (2005) verificaram que temperatura do ar e velocidade do vento são reduzidas respectivamente em 32,0% e 37,0% durante a noite, enquanto umidade relativa aumenta em 39,0%, considerando estes fatores os mesmos encontraram como resultados para um sistema lateral móvel, perdas de aproximadamente 9,8% durante o dia e de 5,0% durante a noite.

Apesar desta vantagem, a irrigação durante a noite pode apresentar algumas outras consequências às quais podem causar outros tipos de danos às culturas. De acordo com Alnaizy e Simonet (2012), a irrigação noturna apresenta um perigo potencial à saúde da planta, uma vez que água fica estagnada atraindo insetos e pode desenvolver fungos em gramados, por exemplo. Ainda de acordo com os autores, em áreas úmidas onde as doenças fúngicas são abundantes (como por exemplo, mofo), a irrigação afetaria tanto a saúde da planta no caso do gramado, e também das

peessoas, pois a água parada pode fazer com que aumente o número de insetos, propiciando surtos de doenças, como a dengue. Desta forma, os autores afirmam que é necessário o conhecimento das condições meteorológicas de cada ambiente, para tornar possível a identificação do período de operação do sistema de irrigação que proporcionará um maior custo benefício.

Pode-se verificar, com base no exposto anteriormente, que as PEA são afetadas por diversos fatores. Desta forma, resumidamente a Tabela 1, apresenta alguns autores e as variáveis meteorológicas e do sistema, as quais os mesmos verificaram que afetam as PEA.

Tabela 1 - Variáveis que afetam as perdas por evaporação de arraste, de acordo, com diferentes autores.

Autores	Variáveis do sistema				Variáveis meteorológicas						Sistema de irrigação
	D_{boc}	D_{got}	h	P	V	T	UR	$e_s - e_o$	R	ET_o	
Frost & Schwalen (1955)	-			+	+	+	-	+			AC
Seginer (1971)					+	+	-			+	AC
Hermesmeier (1973)			+		+	+	-				AC
Yazar (1984)				+	+	+		+			AC
Edling (1985)		-	+		+						AC
Trimmer (1987)	-			+	+			+			AC
Silva and James (1988)		-			+	+	-				AC
Keller and Bliesner (1990)	-			+	+					+	AC
Faci and Bercero (1991)					+						AC
Tarjuelo (1995)		-			+	+	-				AC
Montero (1999)				+	+			+			AC
Tarjuelo et al. (2000)	-	-	+	+	+			+			AC
Faci et al. (2001)	-				+	+					EE
Dechmi et al. (2003)					+						AC
Playán et al. (2004)					+						ME (PC)
Playán et al. (2005)					+						ME (LM)
Ortíz et al. (2009)					+						PC
Yacoubi et al. (2010)					+		+				AC
Sanchez et al. (2011)					+						AC
Beskow et al. (2011)				+	+			+			AC
Colombo et al. (2015)					+						PC

Variáveis: D_{bocl} (diâmetro do bocal), D_{got} (diâmetro da gota), h (elevação do bocal), P (pressão de operação), V (velocidade do vento), T (temperatura do ar), RH (umidade relativa do ar), $e_s - e_o$ (déficit de pressão de vapor), R (radiação solar) e ET_o (Evapotranspiração).

Sistema de irrigação: AC (Aspersão convencional), EE (Equipamento Experimental), ME (PC) (Máquina Experimental (Pivô Central)), ME (LM) (Máquina Experimental (Lateral Móvel)), PC (Pivô Central).

Fonte: Adaptado de Pláyan et al. (2005).

Os fatores citados são alguns dos que afetam a aplicação de água na superfície irrigada. Otimizar esses fatores requer um projeto adequado (espaçamento entre aspersores, bocal selecionado, etc.) e uma seleção adequada das condições de operação (pressão, duração da irrigação, velocidade do vento, temperatura, umidade relativa do ar e etc.), visando à minimização das PEA (HEERMANN et al., 1992). Desta forma, os vários componentes que afetam das perdas nos sistemas de irrigação devem ser identificados antes de serem definidas quaisquer melhorias nos projetos dos mesmos (MCLEAN et al., 2000).

2.7 Estimativa e modelagem das perdas por evaporação e arraste

2.7.1 Faci et al. (2001)

O modelo de Faci et al. (2001) foi desenvolvido para as condições meteorológicas de Zaragoza (Espanha). Para a realização dos experimentos, os autores utilizaram uma estrutura construída com três barras metálicas cilíndricas de 50mm de diâmetro, 3,2m de altura e 4,0m de largura. Os cantos da estrutura foram ancorados ao solo com quatro fios de aço. Além disso, dois arames adicionais horizontais foram instalados dentro do quadro, para evitar vibrações no aspersor spray e possibilitar a alteração da altura do emissor. A estrutura metálica utilizada pode ser visualizada através da Figura 1:

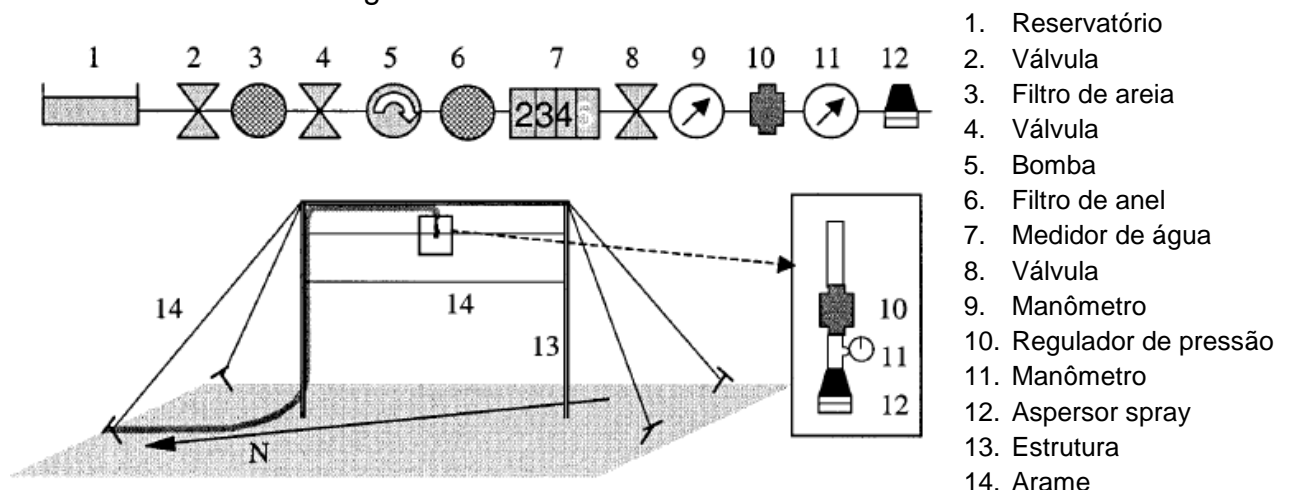


Figura 1 - Estrutura e componentes do experimento utilizado na avaliação da distribuição de água de um único aspersor.

Fonte: Adaptado de Faci et al. (2001).

Na estrutura metálica foram instalados os aspersores, a duas diferentes alturas da superfície do solo sendo: a 1,0m e 2,5m. Os aspersores utilizados foram do tipo spray placa oscilante e spray placa fixa. Os diâmetros de bocais testados foram de 3,8mm, 6,7mm e 7,9mm. Os ensaios foram conduzidos em baixas velocidades do vento ($2,5 \text{ m s}^{-1}$), médias velocidade do vento ($2,5$ a $5,0 \text{ m s}^{-1}$) e em altas velocidades do vento (maior que $5,0 \text{ m s}^{-1}$). A pressão de operação durante as avaliações foi de 140kPa, obtida através do regulador de pressão.

A partir dos dados obtidos foi proposto por Faci et al. (2001) um modelo para estimativa das PEA, o qual considera o diâmetro do bocal do emissor, a velocidade do vento e a temperatura do ar, conforme Equação 1:

$$PEA = -0,74 \cdot D + 2,58 \cdot V + 0,47 \cdot T \quad (1)$$

PEA = perdas por evaporação e arraste (%)

D = diâmetro do bocal (mm)

V = velocidade do vento (m s^{-1})

T = temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$)

Os resultados encontrados pelos autores mostraram uma melhor relação entre a velocidade do vento e as PEA dos aspersores spray placa oscilante do que para os aspersores spray placa fixa.

2.7.2 Dechmi et al. (2003a)

O modelo de Dechmi et al. (2003a) foi gerado para as condições meteorológicas de Zaragoza (Espanha). Os experimentos foram realizados em um sistema de irrigação por aspersão convencional.

No campo os aspersores foram dispostos com um espaçamento de 18 x 15m, a uma altura de 2,30m. Nos ensaios de irrigação foram avaliados os aspersores de impacto com diâmetro de 4,4 x 2,4mm. A pressão de operação foi mantida em 300kPa, resultando em um raio molhado de 11m e uma vazão de descarga de $0,48 \text{ L s}^{-1}$.

Os dados obtidos nos experimentos foram utilizados por Dechmi et al. (2003a) para geração de um modelo para estimativa das PEA, o mesmo tem como variável a velocidade do vento, conforme Equação 2.

$$PEA = 7,449 + 5,287 \cdot V \quad (2)$$

PEA = perdas por evaporação e arraste (%)

V = velocidade do vento (m s^{-1})

Os autores encontraram como resultados valores de PEA variando de 6,0 a 40,0%. O modelo desenvolvido segundo os seus autores pode ser inadequado para baixas velocidades de vento, pois a equação foi gerada com os dados das perdas do vale do Ebro, o qual normalmente apresenta velocidades de vento elevadas. De acordo com os autores, para condições calmas de vento o modelo pode superestimar a PEA.

2.7.3 Playán et al. (2004)

O modelo de Playán et al. (2004) foi desenvolvido para as condições meteorológicas de Zaragoza, Espanha. Os experimentos foram realizados através de uma máquina experimental de irrigação que simula a operação de um sistema mecanizado de irrigação do tipo pivô central.

A máquina projetada consiste de um conduto de aço para abastecimento de água com 26m de comprimento e 80mm de diâmetro interno. No equipamento foram instalados cinco aspersores separados entre si de 6,0m. A tubulação foi apoiada por uma estrutura superior de vigas, e cabos de aço que mantiveram a sua horizontalidade, assim como em qualquer máquina comercial de irrigação por pivô central. A torre foi construída com vigas de aço, minimizando a obstrução às trajetórias da gota de água. O mecanismo de suspensão foi projetado para evitar a transferência de momento da tubulação para a torre e para assegurar a auto estabilização e horizontalidade. A operação manual de uma bobina de cabo permitiu alterar a elevação dos aspersores de pulverização de 1,0 a 2,4m em alguns minutos.

O equipamento foi montado sobre quatro rodas de aço e foi assentado em dois trilhos paralelos de 36m de comprimento, conforme Figura 2. A alimentação do mesmo foi através de um conjunto de dois motores elétricos instalados um na roda dianteira e outro na roda traseira. Um sistema de engrenagens foi projetado para obter três velocidades de deslocamento diferentes: 20,6, 31,1 e 62,1m h⁻¹. Estas velocidades estão dentro da faixa normal de velocidades lineares em pontos diferentes dos sistemas por pivô central.

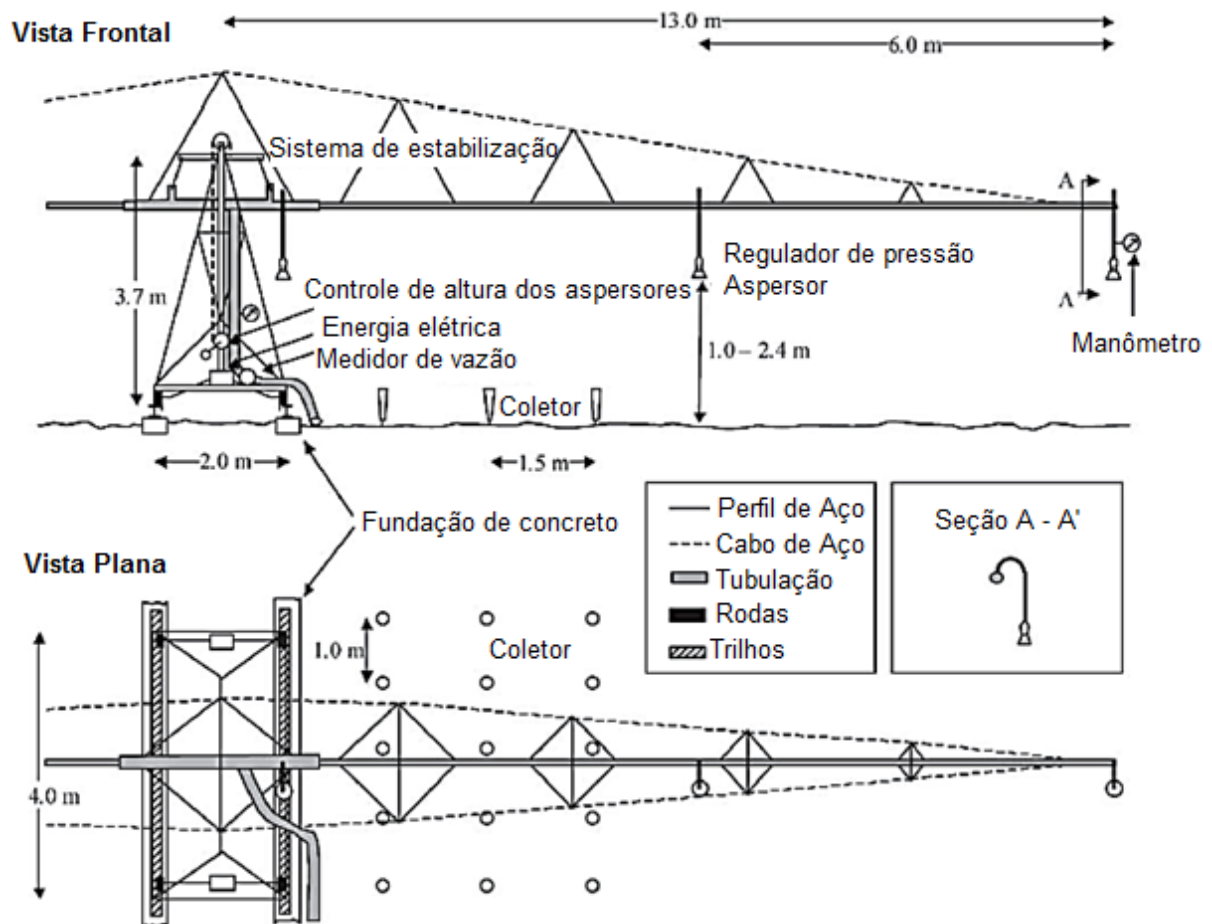


Figura 2 - Máquina de irrigação que simula o funcionamento de um sistema de irrigação do tipo pivô central.

Fonte: Adaptado de Playán et al. (2004).

Os aspersores utilizados nos ensaios de irrigação foram do tipo I-Wob e spray placa rotativa. Para os três modelos de aspersores foram testados três diâmetros de bocais sendo de 3,8, 6,7 e 7,9mm. Os emissores foram posicionados a 1,0 e 2,4m de altura da superfície do solo. Os ensaios foram conduzidos em condições de vento

variando de 0,19 a 4,3m s⁻¹. A pressão de operação dos emissores foi de 140kPa, estabelecida usando reguladores de pressão acima de cada aspersor.

Os dados obtidos nos experimentos foram utilizados por Playán et al. (2004) para geração de um modelo para estimativa das PEA, o mesmo tem como variável a velocidade do vento, conforme Equação 3.

$$PEA = 1,55 + 1,13 \cdot V \quad (3)$$

PEA = perdas por evaporação e arraste (%)

V = velocidade do vento (m s⁻¹)

Os autores obtiveram valores de PEA variando entre 0,3 a 8,3%. No caso dos aspersores com placa fixa as perdas não puderam ser relacionadas com a velocidade do vento, devido à dificuldade de reprodução do volume de coleta de irrigação neste tipo de pulverizador, e ao intervalo estreito entre as velocidades do vento durante os experimentos. No entanto, no caso dos aspersores spray placa rotativa um modelo de regressão linear com base na velocidade do vento explicou 57,0% da variabilidade da PEA. No geral, de acordo com os mesmos não foram encontradas diferenças significativas entres os resultados nas PEA, dos aspersores I-Wob e spray placa rotativa.

2.7.4 Playán et al. (2005)

Os experimentos para obtenção do modelo foram realizados em Zaragoza, Espanha, para condições meteorológicas de dia e da noite. O equipamento utilizado foi uma máquina experimental de irrigação desenvolvida por Playán et al. (2004), para simular um sistema mecanizado do tipo lateral móvel.

Os aspersores testados foram do tipo spray placa rotativa, com diâmetro de bocal de 6,7mm. Os emissores foram instalados na lateral móvel com espaçamento de 3,0m e a uma altura de 2,05m da superfície do solo. A pressão de operação foi de 140 kPa, obtida através de válvulas reguladores de pressão instaladas acima de cada aspersor.

Os dados obtidos através dos experimentos foram utilizados por Playán et al. (2005) para geração de um modelo de estimativa das PEA, o qual tem como variável a velocidade do vento, conforme Equação 4.

$$PEA = 2,7 + 2,31 \cdot V \quad (4)$$

PEA = perdas por evaporação e arraste (%)

V = velocidade do vento (m s^{-1})

Os autores encontraram como resultado dos experimentos uma PEA de 9,8% durante o dia e de 5% durante a noite. De acordo com os mesmos, estes dados evidenciam a importância de escolher o sistema de irrigação adequado e o período mais indicado do dia para irrigar, a fim de promover a conservação da água.

2.7.5 Ortíz et al. (2009)

O modelo de Ortíz et al. (2009) foi desenvolvido para as condições meteorológicas de Albacete, Espanha, para um sistema de irrigação do tipo pivô central. Os experimentos foram realizados no período diurno e noturno. No equipamento foram instalados dois modelos de aspersores: spray placa rotativa e spray placa fixa. Os emissores spray placa rotativa foram inseridos no quinto vão do sistema de irrigação do pivô central a uma distância de 1,0m da superfície do solo e com espaçamento de 1,6m. O diâmetro de bocal utilizado foi de 6,7mm e a pressão de operação em cada aspersor foi 140kPa, obtida através de reguladores de pressão instalados a montante de cada aspersor.

Os dados obtidos através dos experimentos permitiram a geração do modelo proposto por Ortíz et al. (2009), para estimativa das PEA, tem como variável a velocidade do vento, conforme Equação 5.

$$PEA = 0,95 + 1,91 \cdot V \quad (5)$$

PEA = perdas por evaporação e arraste (%)

V = velocidade do vento (m s^{-1})

Os autores concluíram que as perdas durante a irrigação diurna foram aproximadamente 10,0% menores para os aspersores do tipo spray placa rotativa do que para os aspersores spray placa fixa, e 25,0% menor durante a irrigação noturna. Além disso, verificaram também que a velocidade do vento foi à variável explicativa da PEA.

2.7.6 Yacoubi et al. (2010)

Os experimentos para obtenção do modelo foram realizados em região próxima a Aritana, Tunísia, para condições meteorológicas diurnas. Nos experimentos de campo Yacoubi et al. (2010) utilizaram um sistema de irrigação por aspersão convencional.

Os aspersores instalados no campo foram configurados de duas formas, com dois diferentes espaçamentos, sendo em formato quadrado $18 \times 18\text{m}$ e retangular $24 \times 18\text{m}$. Nos experimentos os aspersores avaliados foram de 4,5mm de diâmetro dispostos a 1,0m da superfície do solo. A pressão de operação foi mantida constante em 300kPa, por meio de uma válvula reguladora de pressão.

Os dados dos experimentos foram utilizados para o desenvolvimento da Equação 7, que permite calcular as PEA, por meio das variáveis velocidade do vento e umidade relativa do ar.

$$PEA = 24,91 + 3,70.V - 0,28 . UR \quad (7)$$

PEA = perdas por evaporação e arraste (%)

V = velocidade do vento (m s^{-1})

UR = umidade relativa (%)

Os autores obtiveram como resultado a PEA de 24,0%, os mesmos afirmam que estas PEA estão associadas a variação dos fatores meteorológicos (temperatura, umidade relativa do ar e velocidade do vento) durante os ensaios de irrigação. De acordo com os autores, as implicações hidrológicas destas perdas nas condições de

seca da Tunisia são muito relevantes. No período da noite, os mesmos verificaram uma redução de 7,0% nas PEA.

2.7.7 Sanchez et al. (2011)

Sanchez et al. (2011) desenvolveram um modelo para estimativa das PEA, de um sistema de irrigação por aspersão convencional, nas condições meteorológicas de Zaragoza, Espanha.

No campo foram instalados 24 aspersores, dispostos em forma de quadrado distanciados de 15 em 15m. Nos experimentos foram utilizados aspersores de impacto. Os diâmetros de bocais testados foram de 4,0, 4,4 e 4,8mm, todos a 2,0m de altura da superfície do solo. Os ensaios foram realizados em três diferentes pressões: 240kPa, 320kPa e 420kPa

A partir dos resultados dos experimentos obteve-se a Equação 6, que permite calcular as PEA, por meio das variáveis velocidade do vento e temperatura do ar.

$$PEA = 2,835 \cdot V + 0,433 \cdot T \quad (6)$$

PEA = perdas por evaporação e arraste (%)

V = velocidade do vento (m s⁻¹)

T = temperatura do ar (°C)

Os autores verificaram em seu trabalho que as variáveis explicativas da PEA foram a velocidade do vento e a temperatura. Os mesmos afirmam que investigações aprofundadas são necessárias para compreender os processos envolvidos na formação, na atomização do jato e na evaporação e deriva das gotas de água resultantes. Ainda segundo estes, os modelos físicos desenvolvidos são valiosos para os fabricantes, os agricultores, e para toda a sociedade que precisa e exige um uso eficiente da água.

2.7.8 Colombo et al. (2015)

O modelo de Colombo et al. (2015) foi desenvolvido para as condições meteorológicas diurnas do município de Bom Sucesso, Mina Gerais. O equipamento utilizado foi um sistema de irrigação do tipo pivô central com um raio total irrigado de 432,57m, composto de quatro lances longos e quatro lances médios com diâmetro 6 5/8", e um lance em balanço de 20m.

O sistema foi equipado com reguladores de pressão com valor nominal de 68,9kPa e emissores de água do tipo spray de placa oscilante, modelo I-Wob, com contrapeso, espaçados entre si de 2,30m, montados na extremidade de tubos de descida flexíveis (pendurais), a uma altura de 1,80m da superfície do solo.

Os dados obtidos através dos experimentos foram utilizados por Colombo et al. (2015) para geração de um modelo de estimativa das PEA, o qual tem como variável a velocidade do vento, conforme Equação 8.

$$PEA = - 0,2264 + 2,8281 \cdot V \quad (8)$$

PEA = perdas por evaporação e arraste (%)

V = velocidade do vento (m s⁻¹)

UR = umidade relativa (%)

Os autores obtiveram os valores das perdas de água por evaporação e arraste variando entre 0,2 e 9,99%, com valor médio de 3,38%. Além disso, os mesmos verificaram que no período diurno os valores das PEA foram superiores aos valores observados no período noturno. O modelo de estimativa das PEA proposto, segundo os autores, apresentou melhor adequação aos dados observados e, portanto, pode ser utilizado para condições operacionais e climáticas semelhantes.

3 Material e métodos

3.1 Caracterização da área de estudo

O sistema mecanizado de irrigação por aspersão do tipo lateral móvel está instalado no município do Capão do Leão – RS na Empresa de Pesquisas Agropecuárias (EMBRAPA), especificamente, na Estação Experimental de Terras Baixas (ETB) (Figura 3). No local são produzidas diversas culturas para fins de pesquisa, entre as quais está o arroz, o qual é irrigado por meio do equipamento lateral móvel de irrigação.



Figura 3 – Localização do sistema lateral móvel de irrigação no município do Capão do Leão.

O município do Capão do Leão está localizado em uma zona de transição entre a Planície Costeira Interna e o Planalto Sul-rio-grandense, caracterizando-se como uma área extremamente sensível à ação das atividades humanas. Entre as atividades desenvolvidas na região destaca-se a presença da monocultura de arroz (orizicultura) sobre campos litorâneos (porções mais baixas do relevo) (VIEIRA, 2004).

O clima da região conforme a classificação de Köppen é Cfa, sendo caracterizado como um ambiente subtropical, marítimo, de verão subúmido e o resto do ano úmido ou superúmido. A precipitação pluviométrica média anual do município é de 1280,2mm (MORENO, 1961).

3.2 Ensaios de campo

Os ensaios de campo foram realizados com para possibilitar a estimativa das PEA do sistema lateral móvel de irrigação, as PEA do sistema lateral móvel de irrigação operando com aspersores instalados à diferentes alturas em relação a borda do coletor, e do sistema lateral móvel de irrigação equipado com dois diferentes modelos de aspersores.

3.2.1 Sistema lateral móvel de irrigação

O sistema mecanizado do tipo lateral móvel utilizado neste estudo é da marca Valley, fabricado pela empresa Valmont, o mesmo possui um total de 275m de comprimento, e é dividido em cinco vãos (Figura 4). O sistema de recalque do equipamento é constituído de uma bomba da marca KSB modelo Meganorm 100-250, com uma potência de 24,69CV, o mesmo opera com uma vazão de $179,96\text{m}^3\text{ h}^{-1}$ e uma pressão de 30mca, com capacidade de irrigar simultaneamente uma área de aproximadamente 60 hectares.

Os aspersores instalados no equipamento lateral móvel de irrigação são do modelo I-Wob (placa oscilante), marca Senninger, possuem bocal número 16 (6,35mm) e placa oscilante de 9 jatos, com capacidade de fornecer uma vazão de 1313L.h^{-1} (Figura 5). No equipamento, os emissores foram instalados com espaçamento de 2,3m, dispostos a 2,1m da superfície do solo, fixados em tubos flexíveis de descida fabricados em PVC e com uma placa de contrapeso. Além disso, os mesmos foram equipados com válvulas reguladoras de pressão mantendo-os a uma pressão constante de 68,9kPa (10psi).



Figura 4 – Sistema de irrigação mecanizado lateral móvel instalado na Estação de Terras Baixas.



Figura 5 – Aspensor I-Wob instalado no sistema mecanizado de irrigação do tipo lateral móvel.

Os ensaios de campo para avaliação do sistema lateral móvel de irrigação foram realizados de acordo com os procedimentos estabelecidos na NBR 14244/1998 e na ISO 11545:2001, os quais estão descritos a seguir. No total foram realizados 19 ensaios de campo com o sistema lateral móvel de irrigação, nos meses de março a abril de 2014 no período do dia e em diferentes horários, de modo a atingir uma maior abrangência das condições meteorológicas da região em estudo.

A Figura 6 ilustra o posicionamento dos coletores utilizados na realização dos ensaios de campo, os quais foram espaçados entre si de 3m e dispostos sobre hastes metálicas à 0,70m da superfície do solo. Estes foram instalados em duas linhas distanciadas de 5m e a numeração considera como primeiro o que estava situado próximo ao canal de abastecimento de água e último o situado no final do quinto vão do sistema, totalizando 88 coletores em cada uma das linhas (Figura 7).

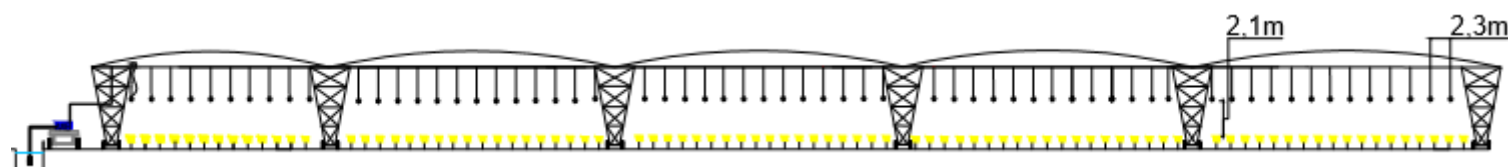


Figura 6 - Vista lateral do sistema lateral móvel de irrigação, com o detalhe do medidor de pressão LAMON (DMP-01-DPP), emissor de Placa Oscilante (I-WOB) e do coletor.

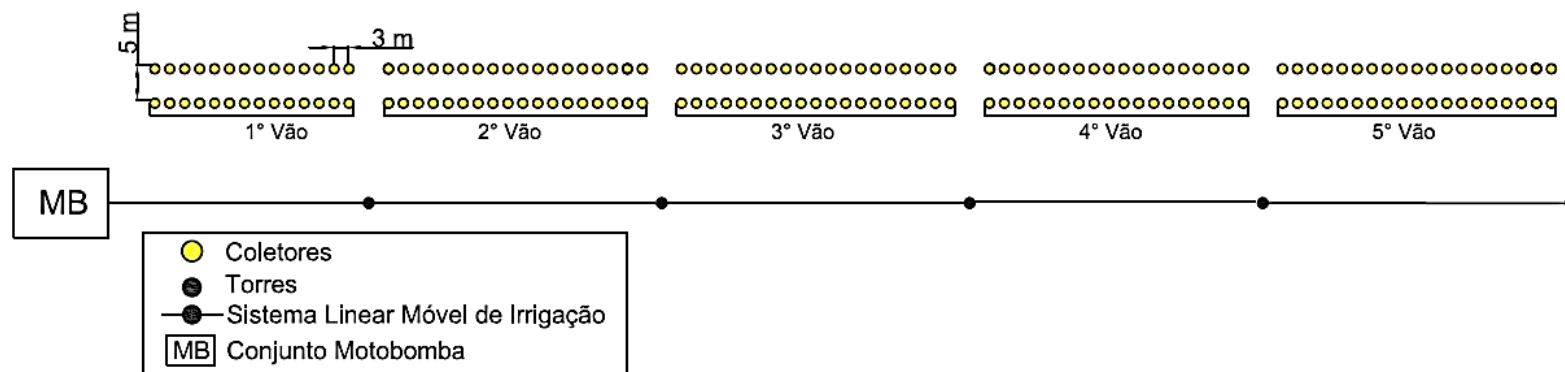


Figura 7 - Vista superior dos coletores dispostos no campo, nos cinco vãos do sistema lateral móvel.

Os coletores de água utilizados nos ensaios de campo são da marca Fabrimar, sendo os mesmos confeccionados em plástico, com seção circular e cor amarela. As dimensões destes são 8cm de diâmetro e 8cm de altura, cuja área de coleta equivale à 50,265cm².

Após a inserção dos coletores, os ensaios de campo eram procedidos da seguinte forma, o sistema lateral móvel em funcionamento realizava o percurso no campo percorrendo sobre os coletores. O ensaio começava quando a água aspergida caía sobre a primeira fileira de coletores e terminava quando o equipamento deixava de aspergir água sobre a segunda fileira de coletores (Figura 8). O horário de início e fim dos ensaios foram anotados em uma planilha, para posterior obtenção dos dados armazenados por meio do *data logger* da estação meteorológica.



Figura 8 – Sistema lateral móvel de irrigação utilizado na realização dos ensaios de campo.

O volume de cada coletor foi mensurado, após o fim da passagem do equipamento sobre os mesmos, por meio de uma proveta graduada de vidro borossilicato sextavada e com bico vertedor. A proveta tem capacidade de medir até 100ml e com precisão de 1ml. Os valores mensurados foram anotados em uma planilha para posterior processamento.

No decorrer dos ensaios, por meio de uma estação meteorológica automática da marca Davis, modelo Vantage Pro2TM Plus, foram monitoradas as variáveis meteorológicas através de sensores de temperatura, umidade relativa do ar, velocidade e direção do vento. A estação, conforme Figura 9, foi instalada a 50m de distância do sistema de irrigação e a 2,0m de altura da superfície do

solo. Os dados meteorológicos foram registrados através de um *data logger* em intervalos regulares de tempo de 1 min.



Figura 9 - Estação meteorológica utilizada para o monitoramento das variáveis meteorológicas durante os ensaios.

A pressão de operação do sistema foi mensurada por meio de manômetros da marca LAMON modelo DMP-01-DDP, e os dados foram armazenados durante os ensaios por meio do *data logger* e posteriormente foram transferidos para um computador portátil. A faixa de leitura do manômetro varia de 0 a 30mca com exatidão de 0,1% FS.

3.2.2 Sistema lateral móvel de irrigação com aspersores I-Wob instalados a diferentes alturas

Os ensaios de campo para avaliar o sistema lateral móvel com aspersores dispostos a duas diferentes alturas da superfície do solo foram realizados em apenas dois vãos do equipamento, sendo estes o segundo e o quarto. Esta metodologia foi baseada em Dukes et al. (2006), os quais avaliaram um sistema mecanizado de irrigação do tipo lateral móvel equipado com aspersor I-Wob e spray placa fixa com ranhuras, ambos operando sob condições de vento, sendo que, para a realização dos experimentos, os mesmos utilizaram apenas um vão do equipamento para cada modelo de aspersor.

A definição dos vãos para realização dos ensaios foi baseada nos resultados preliminares de Chagas Neta et al. (2014), que verificaram por meio

da realização de 16 ensaios de campo, que o segundo e o quarto vão deste equipamento apresentaram valores semelhantes de uniformidade de aplicação de água. Além disso, optou-se por estes vãos visando-se evitar a interferência das diferentes condições de irrigação entre os vãos avaliados.

Nos dois vãos do equipamento, os aspersores ensaiados foram do modelo I-Wob (placa oscilante), marca Senninger, possuem bocal número 16 (6,35mm) e placa oscilante de 9 jatos, com capacidade de fornecer uma vazão de 1313L.h^{-1} . No equipamento, os emissores foram instalados com espaçamento de 2,3m, em tubos flexíveis de descida de PVC, dispostos a 2,1m da superfície do solo e com uma placa de contrapeso. Em cada tubo de descida há uma válvula reguladora de pressão de 68,9kPa (10psi), a qual tem a função de manter todos os emissores operando com a mesma pressão.

Os procedimentos de ensaio foram os mesmos realizados para os cinco vãos do sistema lateral móvel de irrigação, conforme o item 3.4.1, porém os coletores foram instalados apenas nos vãos avaliados, totalizando 36 coletores, sendo 18 em cada vão.

No total foram realizados 11 ensaios de campo nos meses de abril e maio de 2014, tendo os mesmos ocorridos durante o turno do dia e em diferentes horários, visando-se obter uma maior amplitude das variáveis meteorológicas.

3.2.3 Sistema lateral móvel de irrigação equipado com diferentes tipos de aspersores

A avaliação do equipamento lateral móvel com dois diferentes aspersores instalados também foi realizada em somente dois vãos do sistema. Os vãos utilizados nestes ensaios foram o segundo e o quarto, também definidos com base nos resultados de Chagas Neta et al. (2014) e seguindo a metodologia descrita por Dukes (2006).

Os aspersores instalados no quarto vão do equipamento lateral móvel de irrigação são do modelo I-Wob (placa oscilante), marca Senninger, possuem bocal número 16 (6,35mm) e placa oscilante de 9 jatos, com capacidade de fornecer uma vazão de 1313L.h^{-1} (Figura 5). No entanto, no segundo vão do

equipamento foram instalados emissores Super Spray (Figura 10), marca Senninger, com bocal número 16 (6,35mm) e placa fixa com 36 ranhuras, com capacidade de fornecer uma vazão de 1313L.h^{-1} .

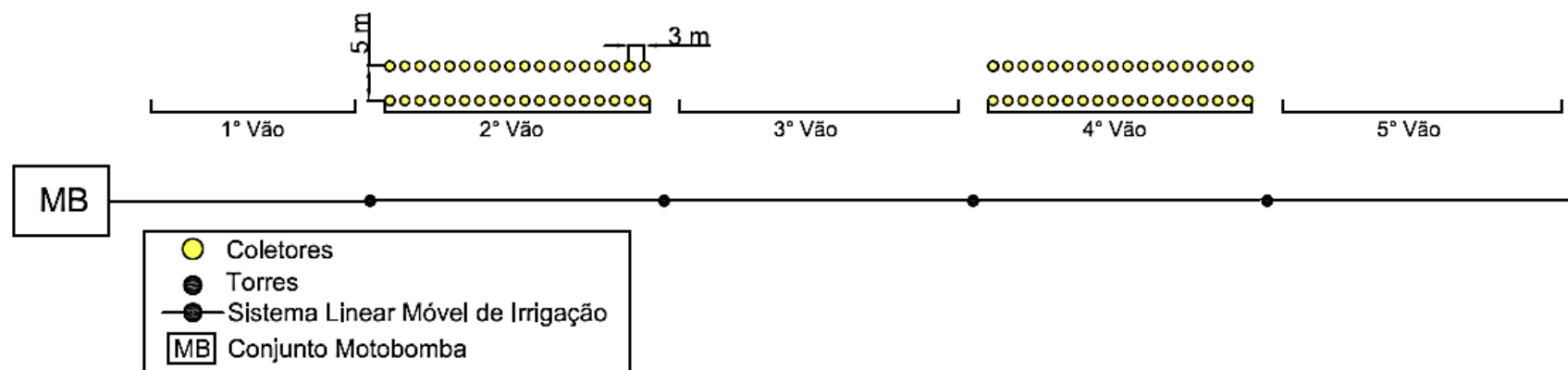
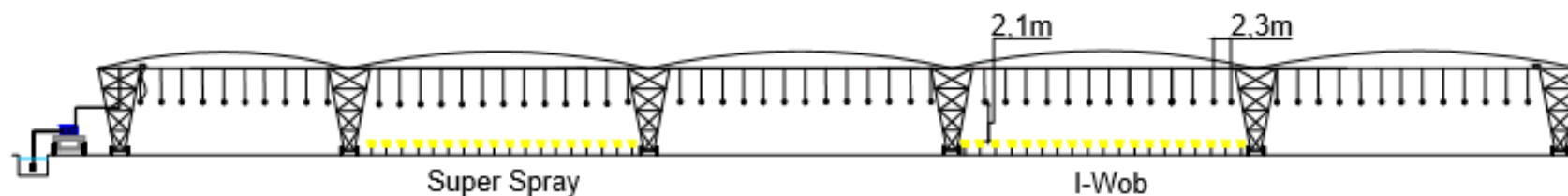


Figura 10 - Aspersor Super Spray instalado no sistema mecanizado de irrigação do tipo lateral móvel.

No equipamento, os emissores foram instalados com espaçamento de 2,3m, em tubos flexíveis de descida de PVC, dispostos a 2,1m em relação a borda do coletor. Em cada tubo de descida há uma válvula reguladora de pressão de 68,9kPa (10psi), a qual tem a função de manter todos os emissores operando com a mesma pressão (Figura 11).

Os procedimentos de ensaio para avaliação das PEA foram os mesmos realizados para o todos os vãos do equipamento lateral móvel conforme descrito no item 3.4.1, porém, neste caso, foi necessário instalar coletores apenas no segundo e no quarto vão, conforme a Figura 12, totalizando 36 coletores, sendo 18 em cada vão.

No total foram realizados 10 ensaios de campo para a avaliação das PEA, sendo que estes ocorreram nos meses de janeiro, fevereiro, abril e maio de 2015, durante o dia e em diferentes horários, com o intuito de obter uma maior variabilidade das variáveis meteorológicas.



4.5 Processamento de dados

Os dados levantados durante os ensaios de campo foram plotados em planilhas eletrônicas e, posteriormente, processados através das seguintes análises estatísticas.

4.5.1 Estimativa das perdas por evaporação e arraste

As PEA foram estimadas através da Equação 9, a qual relaciona a lâmina média aplicada (LMA) durante os ensaios, com a lâmina média coletada após os ensaios (LMC).

$$PEA = \left(\frac{LMA - LMC}{LMA} \right) \cdot 100 \quad (9)$$

PEA = Perdas por evaporação e arraste durante o deslocamento do equipamento (%)

LMA = Lâmina média aplicada pelos emissores durante deslocamento do equipamento (mm)

LMC = Lâmina média coletada após passagem dos emissores sobre os coletores (mm)

Na determinação da LMA aplicada pelo equipamento lateral móvel utilizou-se a Equação 10, sendo primeiramente necessário determinar a vazão do emissor, bem como a velocidade de deslocamento do equipamento de irrigação.

$$LMA = \frac{Q}{V \cdot E} \quad (10)$$

LMA = Lâmina média aplicada (mm)

Q = Vazão do emissor (l h⁻¹)

V = Velocidade de deslocamento do equipamento (m h^{-1})

E = Espaçamento entre emissores (m)

A determinação da vazão do emissor (Q) foi realizada pelo método gravimétrico, utilizou-se para determinação de vazão 5 emissores de cada vão do equipamento, sendo que, para cada emissor, foram realizadas 5 repetições. A medição da vazão foi realizada da seguinte forma: por meio de um recipiente coletou-se a água aspergida pelo emissor, e paralelamente cronometrou-se o tempo de enchimento do recipiente. Após, a massa de água coletada através do recipiente foi mensurada através uma balança digital. Desta forma, foi obtida a massa de água em um determinado tempo de coleta, permitindo assim, o cálculo da vazão.

Na determinação da velocidade de deslocamento do sistema de irrigação foi necessário primeiramente demarcar 7,5m antes da primeira linha de coletores e 7,5m depois da segunda linha de coletores, na primeira e na última torre do equipamento, somado ao espaçamento de 5m entre as linhas de coletores, totalizou uma distância de 20m. Na realização de cada ensaio foi cronometrado o tempo que o sistema lateral móvel de irrigação levou para percorrer esta distância. A obtenção do tempo e da distância percorrida possibilitou posterior cálculo da velocidade do equipamento. O mesmo procedimento foi realizado para os ensaios com os aspersores instalados a duas diferentes alturas da superfície do solo, porém neste caso mediu-se a velocidade de deslocamento na segunda e quarta torre do equipamento.

Na obtenção da velocidade de deslocamento do sistema de irrigação operando com dois diferentes aspersores foi necessário verificar a velocidade de deslocamento nos dois vãos do equipamento com duas distâncias distintas, devido as diferentes características dos modelos de aspersores. No segundo vão do equipamento foi demarcado 5,0m antes da primeira linha de coletores e 5,0m depois da segunda linha de coletores, somado ao espaçamento de 5,0m entre as linhas de coletores, totalizou uma distância de 15m. No quarto vão do equipamento manteve-se a demarcação de 7,5m, com uma distância total de 20m. Na realização de cada ensaio foi cronometrado o tempo que o sistema

lateral móvel de irrigação levou para percorrer cada uma das distâncias. A obtenção do tempo e da distância percorrida possibilitou posterior cálculo da velocidade de deslocamento no segundo e no quarto vão do equipamento.

4.5.2 Estimativa das perdas por evaporação e arraste por diferentes modelos

Pesquisadores desenvolveram algumas equações empíricas para estimativa das PEA, para diversas condições meteorológicas, em diferentes países e para sistemas de irrigação específicos. Neste trabalho, foram avaliadas as equações listadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Modelos empíricos propostos por pesquisadores para determinação das perdas por evaporação e arraste.

Autor	Local	Equação	R ²	E
Faci et al. (2001)	Zaragoza (ES)	$PEA = -0,74 \cdot D + 2,58 \cdot V + 0,47 \cdot T$	0,69	(1)
Dechmi et al. (2003b)	Zaragoza (ES)	$PEA = 7,449 + 5,287 \cdot V$	0,81	(2)
Playán et al. (2004)	Zaragoza (ES)	$PEA = 1,55 + 1,13 \cdot V$	0,57	(3)
Playán et al. (2005)	Zaragoza (ES)	$PEA = 2,7 + 2,31 \cdot V$	0,60	(4)
Ortíz et al. (2009)	Albacete (ES)	$PEA = 0,95 + 1,91 \cdot V$	0,58	(5)
Yacoubi et al. (2010)	Aritana (TUN)	$PEA = 24,91 + 3,70 \cdot V - 0,28 \cdot UR$	0,53	(7)
Sanchez et al. (2011)	Zaragoza (ES)	$PEA = 2,835 \cdot V + 0,433 \cdot T$	0,93	(6)
Colombo et al. (2015)	Minas Gerais (BR)	$PEA = -0,2264 + 2,8281 \cdot V$	0,93	(8)

D – diâmetro do bocal (mm), T – temperatura (°C), V – velocidade do vento (m s⁻¹) e UR – umidade relativa do ar (%).

Os modelos da Tabela 2 foram utilizados para estimativa das PEA por meio das variáveis meteorológicas monitoradas nos ensaios de campo e das características do equipamento. Em seguida, os resultados obtidos foram comparados graficamente com as PEA determinadas de forma experimental.

Os resultados das PEA obtidos por meio dos diferentes modelos também foram avaliados estatisticamente através do índice de desempenho (c) proposto

por Camargo e Sentelhas (1997), o qual relaciona coeficiente de correlação - precisão (r) e o índice de Willmott - exatidão (d). De acordo com Leitão et al. (2007), neste índice, a precisão é dada pelo coeficiente de correlação que indica o grau de dispersão dos dados obtidos em relação à média, ou seja, o erro aleatório. A exatidão está relacionada ao afastamento dos valores estimados em relação aos observados.

O índice de concordância (d) de Willmott é dado pela equação 11, sendo que resultado igual 0 indica nenhuma concordância e 1 corresponde a concordância perfeita, o qual foi utilizado para análise estatística de Camargo e Sentelhas (1997).

$$d = 1 - \left[\frac{\sum (P_i - O_i)^2}{\sum (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \right] \quad (11)$$

P_i = valores estimados de perdas por evaporação e arraste

O_i = valores de perdas por evaporação e arraste dos ensaios de campo

\bar{O} = média dos valores de perdas obtidos por meio dos ensaios de campo

O índice de desempenho (c) é resultado da multiplicação do coeficiente de correlação (r) e do índice de Willmott (d), conforme equação 12 (CAMARGO e SENTELHAS, 1997):

$$c = r \cdot d \quad (12)$$

O índice de confiança de desempenho será avaliado segundo a Tabela 3:

Tabela 3 - Análise de desempenho com base no índice de confiança de desempenho (CAMARGO e SENTELHAS, 1997).

Índice de confiança	Desempenho
$c > 0,85$	Ótimo
$0,76 \leq c \leq 0,85$	Muito Bom
$0,66 \leq c \leq 0,75$	Bom
$0,61 \leq c \leq 0,65$	Mediano
$0,51 \leq c \leq 0,60$	Sufrível
$0,41 \leq c \leq 0,50$	Mau
$c \leq 0,40$	Péssimo

4.5.3 Modelagem das perdas por evaporação e arraste do sistema lateral móvel de irrigação

Na modelagem das PEA do sistema lateral móvel foram utilizados os resultados das PEA observadas do equipamento e as variáveis meteorológicas monitoradas durante estes ensaios de campo.

No entanto, primeiramente aplicou-se o teste-*t* de Student ao nível de 5% de significância, para verificar quais das variáveis meteorológicas influenciaram de forma significativa os resultados das PEA observadas. O teste-*t* foi aplicado por meio do programa *SigmaPlot*, entre as PEA observadas e as variáveis meteorológicas velocidade do vento, umidade relativa do ar e temperatura do ar.

Em seguida, também por meio do *SigmaPlot*, realizou-se uma regressão linear simples entre as PEA e a variável meteorológica significativa ao nível de 5%, para geração de um modelo para estimativa das PEA, seguindo a metodologia de Playán et al. (2004; 2005), Ortiz et al. (2009) e Colombo et al. (2015).

4.5.4 Modelagem das perdas por evaporação e arraste do sistema lateral móvel de irrigação equipado com aspersores instalados a diferentes alturas

Nesta etapa foram utilizadas as PEA dos aspersores instalados na altura 1,3m e 2,1m da borda do coletar e a variável meteorológica que influencia significativamente as PEA ao nível de 5%.

No entanto, primeiramente realizou-se o teste estatístico de Tukey, o qual tem como função comparar os valores médios de duas séries dados e determinar se existem diferenças significativas entre estas. O teste Tukey foi aplicado por meio do *software Action* entre os resultados das PEA observadas dos aspersores instalados a 1,3 e a 2,1m de altura em relação a borda do coletor, com o objetivo de avaliar estatisticamente a existência de diferenças significativas, ao nível de 5%.

Na existência de diferenças significativas será gerado um modelo para altura de 1,3m e outro para altura de 2,1m em relação a borda do coletor. No desenvolvimento do modelo, será utilizado o *software SigmaPlot*, o qual permitirá a geração de duas regressões lineares simples entre as PEA observadas da altura de 1,3 e 2,1m da borda do coletor e a variável meteorológica significativa ao nível de 5% de significância, seguindo a metodologia de Playán et al. (2004; 2005), Ortiz et al. (2009) e Colombo et al. (2015).

4.5.5 Modelagem das perdas por evaporação e arraste do sistema lateral móvel equipado com diferentes tipos de aspersores

Nesta etapa foram utilizadas as perdas dos aspersores I-Wob e Super Spray, e a variável meteorológica que segundo teste-*t* de Student influencia significativamente as PEA ao nível de 5%.

No entanto, primeiramente realizou-se o teste estatístico de Tukey, o qual tem como função comparar os valores médios de duas séries dados e determinar se existem diferenças significativas entre estas. O teste Tukey foi aplicado por meio do *software Action* entre os resultados das PEA observadas dos aspersores instalados a I-Wob e Super Spray, com o objetivo de avaliar estatisticamente a existência de diferenças significativas, ao nível de 5% de significância.

Na existência de diferenças significativas será gerado um modelo para o aspersor Super Spray. No desenvolvimento do modelo, será utilizado o *software SigmaPlot*, o qual permitirá a geração de uma regressão linear simples entre as PEA observadas do aspersor Super Spray e a variável meteorológica

significativa ao nível de 5% de significância, seguindo a metodologia de Playán et al. (2004; 2005), Ortiz et al. (2009) e Colombo et al. (2015).

5 Resultados e Discussão

5.1 Perdas de água por evaporação e arraste do sistema lateral móvel de irrigação

Na Tabela 4 são apresentados os resultados das PEA obtidos por meio dos ensaios de campo realizados com o sistema mecanizado de irrigação do tipo lateral móvel, juntamente com as variáveis meteorológicas velocidade do vento, umidade relativa e temperatura do ar, monitoradas durante os 19 ensaios de campo.

Tabela 4 - Resultados das perdas por evaporação e arraste e variáveis meteorológicas monitoradas durante os ensaios de campo.

Data	T (°C)	UR (%)	V (m s⁻¹)	PEA (%)
12/03/2014	25,57	53,36	1,89	15,83
13/03/2014	24,40	75,48	2,30	11,71
22/03/2014	17,56	58,32	5,86	22,76
22/03/2014	16,15	68,81	4,97	24,81
22/03/2014	18,18	50,59	6,09	26,75
23/03/2014	16,62	77,00	1,18	8,31
05/04/2014	30,08	66,85	0,76	5,86
05/04/2014	27,17	75,00	0,93	10,99
05/04/2014	24,05	88,71	1,25	12,66
05/04/2014	28,50	73,87	4,09	17,36
06/04/2014	26,13	84,41	1,65	6,38
06/04/2014	24,30	89,29	0,71	7,58
06/04/2014	27,66	76,96	3,71	11,36
06/04/2014	29,98	63,79	2,75	11,53
23/04/2014	16,85	77,63	1,99	8,50
23/04/2014	15,15	84,14	2,08	9,59
23/04/2014	19,32	64,22	1,47	9,81
23/04/2014	20,66	49,48	0,64	9,87
23/04/2014	21,13	51,69	1,31	11,32
Média	22,60	69,98	2,40	12,79
Desvio Médio	4,40	10,81	1,37	4,59

Temperatura - T, Umidade Relativa - UR e Velocidade do vento - V

Pode-se observar na Tabela 4 que os ensaios realizados apresentaram temperatura variando de 15,15 a 30,08°C, com valor médio de 22,60°C. A umidade relativa do ar manteve-se entre 50,0 a 89,0%, com valor médio de 69,98%. A velocidade do vento variou de 0,64 a 6,09m s⁻¹, com valor médio de 2,40m s⁻¹. E os resultados das PEA variaram aproximadamente de 5,86 a 26,75%, com valor médio de 12,79%.

Na Tabela 4, verifica-se que o sistema lateral móvel de irrigação, de modo geral, apresentou baixos resultados de PEA, sendo que de todos os ensaios realizados apenas quatro resultaram em PEA maiores, correspondendo a 17,36%, 22,76%, 24,81% e 26,75%. Estes maiores resultados de PEA, estão associados a velocidade do vento, a qual foi elevada durante a realização destes experimentos.

Nesse sentido, também pode-se observar, que os resultados das PEA variaram em função da velocidade do vento, sendo que a elevação da velocidade do vento durante as realizações dos ensaios de campo proporcionou o aumento das PEA. No entanto, as variáveis temperatura e umidade relativa do ar não influenciaram a variação das PEA.

Os resultados de PEA, para maioria dos ensaios de campo, indicam que o sistema lateral móvel de irrigação pode ser utilizado nas condições meteorológicas do sul do RS, porém deve-se atentar a operação deste equipamento em condições de altas velocidades do vento.

Playán et al. (2004) avaliaram uma máquina experimental que simula um sistema de irrigação do tipo lateral móvel em Zaragoza (Espanha) e obtiveram como resultado PEA observadas variando de 0,3 a 9,8%, com velocidades do vento de 0,19 a 4,3m s⁻¹. Os resultados de PEA deste trabalho são superiores comparados aos de Pláyan et al. (2004), devido a maior amplitude da velocidade do vento durante a realização dos experimentos, a qual foi de 0,64 a 6,09m s⁻¹.

As PEA estimadas por Colombo et al. (2015), para um sistema de irrigação do tipo pivô central nas condições meteorológicas de Bom Sucesso-MG (Brasil), variaram de 0,2 a 9,99%. Os autores obtiveram menores resultados de PEA em relação a este trabalho, pois a velocidade do vento monitorada

durante os ensaios de campo dos mesmos, permaneceu no intervalo de 0,07 a 3,34m s⁻¹.

No entanto, os resultados das PEA observadas de Yacoubi et al. (2010) apresentaram maior amplitude quando comparados ao deste trabalho, os mesmos realizaram experimentos em uma região próxima a Aritana (Tunísia) em condições meteorológicas diurnas, por meio de um sistema de irrigação por aspersão convencional. Os autores obtiveram como resultados PEA de 6,0 a 46,0%, com um intervalo de variação da velocidade do vento similar ao deste estudo de 1,8 a 6,1m s⁻¹. Entretanto, os ensaios de campo realizados por Yacoubi et al. (2010) apresentaram menores valores de umidade relativa (15,0 a 60,0%) e uma maior variação da temperatura do ar (24,0 a 44,0°C), o que possivelmente proporcionou uma elevada PEA máxima. Da mesma forma, Dechmi et al. (2003a) em condições de velocidade do vento variando de 0,6 a 6,5m s⁻¹ em Zaragoza (Espanha), por meio de um sistema de irrigação por aspersão convencional, também encontraram como resultados PEA de 6,0 a 40,0%.

Desta forma, percebe-se por meio da comparação dos resultados de trabalhos realizados em diferentes tipos de equipamentos, aspersores e condições meteorológicas, que a velocidade do vento é a variável que apresenta uma maior influência nas PEA. Além disso, constatou-se que elevadas velocidades do vento, de modo geral, proporcionaram maiores PEA.

5.2 Perdas por evaporação e arraste estimadas por diferentes modelos

As PEA foram estimadas por meio de diferentes modelos empíricos presentes na literatura, com base nas características do equipamento lateral móvel de irrigação e também nas variáveis meteorológicas monitoradas durante os ensaios de campo. Na Figura 13, estão os resultados das PEA estimadas pelos modelos em função das PEA observadas nos experimentos de campo, visando avaliar a aplicabilidade destes modelos aos dados deste trabalho.

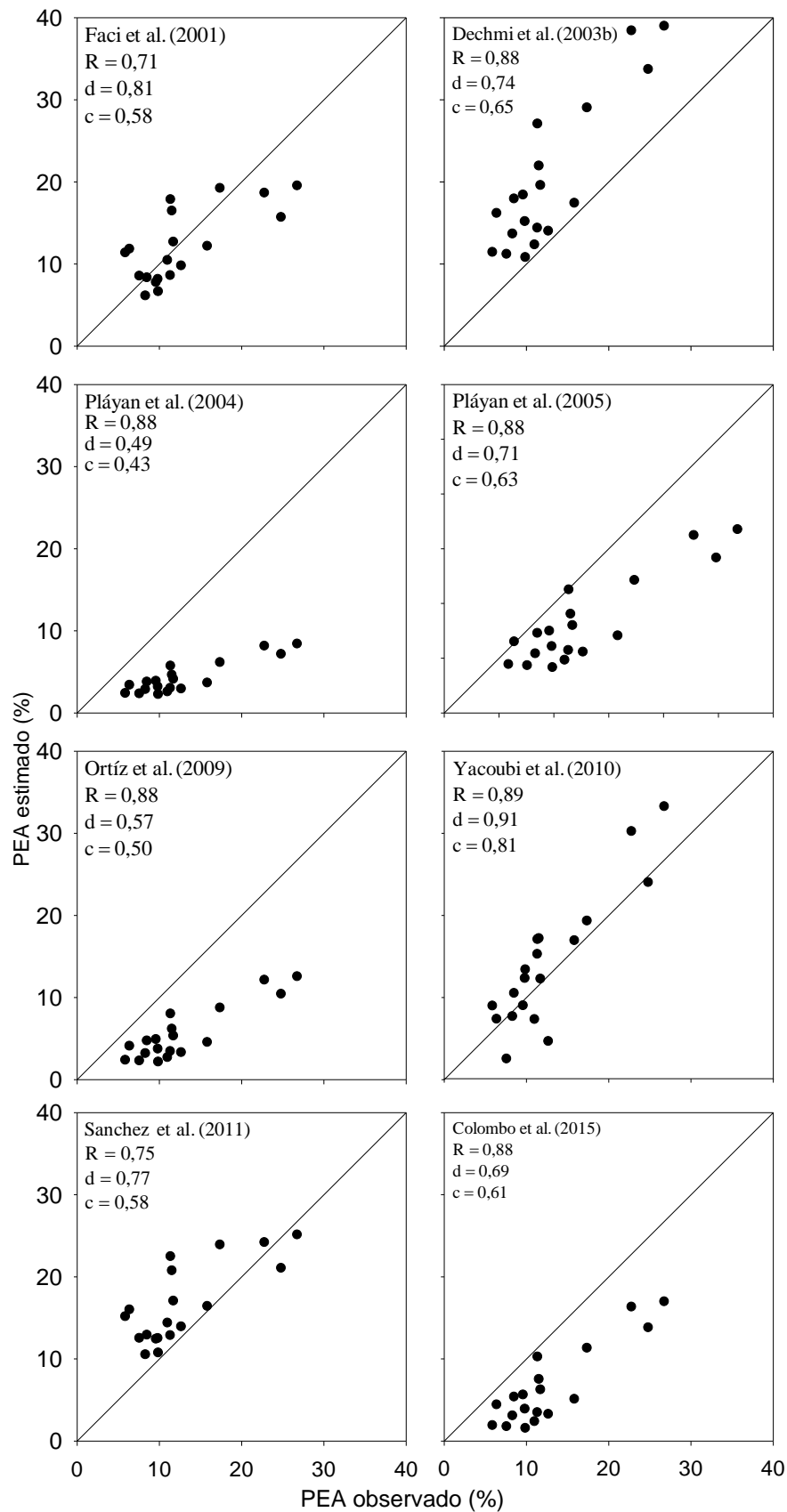


Figura 13 - Resultados das PEA observadas do aspersor I-Wob em função das PEA estimadas com os modelos presentes na literatura.

Observa-se na Figura 13 as PEA estimadas pelo modelo de Faci et al. (2001) apresentaram-se próximos a reta 1:1, indicando similaridades entre os dados estimados e os observados, porém o desempenho do mesmo foi classificado como “Sofrível”, segundo a classificação de Camargo e Sentelhas (1997).

Faci et al. (2001) utilizou os resultados de PEA obtidos por meio de uma estrutura experimental metálica com apenas um aspersor instalado, a qual apresenta características diferentes do equipamento utilizado neste trabalho, sendo este um dos fatores que influenciou o ajuste dos dados ao modelo. Além disso, os ensaios de campo no estudo de Faci et al. (2001) foram realizados em condições meteorológicas distintas das deste estudo, proporcionando características diferentes de operação e, conseqüentemente, dados utilizados na geração do modelo.

Pláyan et al. (2005) também simularam as PEA por meio do modelo desenvolvido por Faci et al. (2001). Os autores obtiveram, de forma similar, uma determinada adequação do modelo aos seus dados, isto está associado ao local de realização dos experimentos, o qual foi o mesmo para ambos os modelos, possibilitando que as variáveis meteorológicas monitoradas durante os ensaios de campo fossem semelhantes. Entretanto, mesmo com as condições de operação praticamente iguais, o ajuste do modelo de Faci et al. (2001) aos dados dos experimentos de Playán et al. (2005) não foi satisfatório, segundo Pláyan et al. (2005) a razão para a pobre adequação do modelo pode ser devido a prováveis erros de medição e as variáveis do sistema de irrigação.

O modelo desenvolvido por Dechmi et al. (2003b) superestimou as PEA e o desempenho do modelo segundo a classificação de Camargo e Sentelhas (1997), foi considerado “Mediano”. Dechmi et al. (2003b) utilizaram um sistema de irrigação por aspersão convencional na geração do modelo, o qual apresenta configurações de campo específicas e características distintas do equipamento utilizado neste estudo.

Nos sistemas de irrigação por aspersão convencional, os aspersores ficam dispostos por meio de tubos que apresentam uma determinada altura fixa, os mesmos ficam posicionados sempre no mesmo local durante a irrigação da

cultura, diferentemente do sistema lateral móvel que durante a irrigação desloca-se sobre a área irrigada. Desta forma, a superestimação das PEA pelo modelo de Dechmi et al. (2003b) pode ser atribuída as diferenças entre os sistemas de irrigação utilizados.

O sistema de irrigação por aspersão convencional utilizado no estudo de Dechmi et al. (2003b) foi equipado com aspersores de impacto com diâmetro de 4,4 x 2,4mm operando com uma pressão de 300kPa. Os aspersores de impacto apresentam um comportamento diferente em relação ao funcionamento e aplicação de água na superfície do solo, comparado ao aspersor I-Wob, podendo este fator ter influenciado o ajuste do modelo.

O diâmetro do aspersor utilizado por Dechmi et al. (2003b) foi inferior ao deste trabalho e a pressão de operação manteve-se superior, a combinação destas condições de operação afetaram os resultados das perdas estimadas pelo modelo, pois, segundo Sanchez et al. (2011), o diâmetro e a pressão são fatores importantes na performance do sistema de irrigação, devido ao efeito destes no processo de atomização do jato. Neste sentido, Montero et al. (2003) mensuraram o diâmetro das gotas de aspersores através de um espectro pluviômetro óptico e verificaram que a pressão de operação foi o principal fator a influenciar a distribuição e o tamanho das gotas, ainda segundo os autores, quando a pressão de operação do aspersor foi reduzida, o tamanho das gotas aspergidas foi em geral maior.

O menor diâmetro do aspersor e a pressão maior de operação durante a irrigação por aspersão geram gotas com diâmetro pequeno, as quais são mais suscetíveis ao arraste do vento durante a sua trajetória até a superfície do solo. De acordo com Playán et al. (2005), na irrigação por aspersão, as gotas maiores são mais resistentes à deriva e apresentam menor área por unidade de massa, como consequência, são menos afetadas pelas PEA. Desta forma, verifica-se que devido aos menores diâmetros de gotas as PEA no estudo de Dechmi et al. (2003b) foram maiores que a deste estudo, sendo possivelmente a diferença entre o diâmetro de aspersor e a pressão do sistema a principal causa da superestimação das PEA por este modelo.

No entanto, deve-se ressaltar também que as condições meteorológicas de Zaragoza, onde foram realizados os experimentos de Dechmi et al. (2003b), são distintas da região deste estudo, o que provavelmente contribuiu para a inadequação do modelo.

O modelo proposto por Pláyan et al. (2004) subestimou as PEA, em relação as perdas obtidas com os experimentos em campo, sendo o desempenho do mesmo classificado como “Mau”. Pláyan et al. (2004) avaliou uma máquina experimental que simula um sistema de irrigação por aspersão do tipo pivô central, a qual é diferente do equipamento utilizado nos ensaios de campo deste trabalho e também apresenta características distintas de funcionamento, sendo um dos fatores que influenciou o ajuste do modelo.

Os ensaios de campo de Pláyan et al. (2004) foram realizados durante o período do dia, com a velocidade do vento variando de 0,19 a 0,43m s⁻¹, as quais proporcionaram PEA na faixa de 0,3 a 9,8%. A velocidade do vento monitorada neste trabalho apresentou um intervalo de variação de 0,64 a 6,09m s⁻¹, o que resultou em PEA de 5,86 a 26,75%. Desta forma, pode-se verificar que a diferença entre as condições meteorológicas das regiões estudadas pode ser o principal fator responsável pela subestimação das PEA.

Resultados semelhantes foram obtidos por Colombo et al. (2015), os quais também aplicaram o modelo de Pláyan et al. (2004). Os resultados dos mesmos também apresentaram um índice de desempenho classificado de acordo com Camargo e Sentelhas (1997) como “Mau”. Os autores também afirmam que as limitações do modelo de Playán et al. (2004) podem ser atribuídas ao fato de que o mesmo foi gerado com uma máquina experimental que simula um equipamento de irrigação. Além disso, outro fator que proporcionou diferenças entre os resultados são as condições meteorológicas, as quais são distintas, pois o modelo de Colombo et al. (2015) foi desenvolvido em uma região com baixas velocidades do vento, sendo o oposto das velocidades predominantes em Zaragoza, onde foram realizados os experimentos de Pláyan et al. (2004).

Playán et al. (2005) também aplicaram o modelo desenvolvido por Playán et al. (2004), o qual foi desenvolvido nas mesmas condições meteorológicas. No

entanto, Playán et al. (2005) utilizaram uma máquina experimental que simula um sistema de irrigação mecanizado do tipo lateral móvel, sendo diferente da máquina experimental que simula o equipamento do tipo pivô central utilizada nos experimentos de Playán et al. (2004). O modelo de Playán et al. (2004) também subestimou as PEA em relação aos dados de Playán et al. (2005), os mesmos afirmam que o mau desempenho do modelo está relacionado com as variáveis do sistema de irrigação ou com erros de medição.

O modelo de Pláyan et al. (2005) subestimou as PEA, em relação as obtidas nos experimentos de campo, porém o desempenho do sistema foi classificado como “Mediano” ($c = 0,63$). Playán et al. (2005), em seus experimentos, utilizaram uma máquina experimental que simula um sistema de irrigação do tipo lateral móvel, a qual apresenta características específicas, porém o funcionamento é semelhante ao equipamento avaliado neste trabalho. No entanto, por ser uma máquina experimental, a mesma apresenta algumas particularidades, como o fato de não possuir torres autopropelidas ao longo de sua estrutura, fazendo com que o equipamento funcione como um vão em balanço, sendo diferente do sistema lateral móvel.

No estudo de Pláyan et al. (2005) durante os experimentos de campo a velocidade do vento variou de $0,06$ a $4,51 \text{ m s}^{-1}$, sendo este intervalo de variação inferior ao deste trabalho que foi de $0,64$ a $6,09 \text{ m s}^{-1}$. Desta forma, verifica-se que a velocidade do vento monitorada durante os ensaios de campo realizados por Pláyan et al. (2005) apresentou um intervalo de variação inferior à desta região. Esta variável possivelmente foi responsável pelas menores PEA obtidas por Pláyan et al. (2005) e consequentemente a causa da subestimação das PEA com os dados deste estudo.

Colombo et al. (2015) obteve resultados semelhantes ao deste trabalho, com uma inadequação do modelo de Playán et al. (2005) aos dados dos experimentos de campo, porém os mesmos encontraram como resultado um índice classificado como “Sofrível” ($c = 0,56$). Os autores relatam que este desempenho inadequado deve-se a máquina experimental utilizada por Playán et al. (2005) que apresenta características específicas e também distintas condições de operação.

As PEA também foram simuladas por Beskow et al. (2011) por meio do modelo de Playán et al. (2005), estes encontraram como resultado um “Péssimo” índice de desempenho, o qual também foi obtido por Beskow et al. (2008). As diferenças entre os resultados obtidos com o modelo proposto por Playán et al. (2005) e os dados de ensaios de campo de ambos estudos podem ser atribuídas aos diferentes tamanhos de diâmetros de bocais utilizados, o que acarreta em diferentes pulverizações de gotas e, conseqüentemente, diferentes PEA (SMAJSTRLA; ZAZUETA, 2003; BESKOW et al., 2008).

O modelo de Ortíz et al. (2009) subestimou as PEA em relação as obtidas por meio dos ensaios de campo e o desempenho do modelo foi classificado como “Mau”. Ortíz et al. (2009) utilizou em seus experimentos um sistema de irrigação do tipo pivô central, o qual apresenta funcionamento e características distintas do equipamento do tipo lateral móvel utilizado neste trabalho. As diferenças entre os sistemas de irrigação utilizados afetaram o ajuste do modelo.

No equipamento de irrigação do tipo pivô central no estudo de Ortíz et al. (2009) foram instalados aspersores do tipo spray placa rotativa com espaçamento de 1,6m. No entanto, neste trabalho foram avaliados aspersores I-Wob, os quais foram distanciados no equipamento lateral móvel de 2,3 em 2,3m, sendo esta distância superior a utilizada por Ortiz et al. (2009). O menor espaçamento resulta em um número maior de aspersores instalados no equipamento.

Nesse sentido, de acordo com Ortega et al. (2000), quando vários aspersores operam simultaneamente, cria-se um microclima favorável entre estes, o que diminui as PEA, quando comparado com aspersores operando isoladamente. Desta forma, a maior quantidade de aspersores no estudo de Ortíz et al. (2009) proporcionou a geração de um microclima favorável no estudo, o qual diminui as PEA e possivelmente causou a subestimação das PEA deste trabalho.

O aspersor no sistema de irrigação do tipo pivô central no estudo de Ortíz et al. (2009) foi instalado a 1,0m da superfície, o que proporcionou PEA menores que as verificadas neste trabalho. A altura do aspersor influencia as perdas de modo que quanto mais elevado estiver o aspersor maior será a trajetória das

gotas até a superfície do solo, aumentando o tempo de contato com o ar e assim a suscetibilidade a fatores meteorológicos. Desta forma, a redução da altura do emissor em relação à cultura é uma das técnicas para redução das perdas (HEINEMMAN et al., 1998; PLAYÁN et al., 2005). Neste sentido, a menor altura do aspersor no estudo de Ortiz et al. (2009) é outro fator que influenciou a subestimação das PEA.

Os experimentos de Ortiz et al. (2009) foram realizados nas condições meteorológicas de Albacete (Espanha), a qual apresenta características particulares, distintas da região sul do Rio Grande do Sul. Desta forma, verifica-se que as condições meteorológicas também podem influenciar na modelagem das PEA.

As PEA também foram simuladas por Colombo et al. (2015), pelo modelo proposto por Ortiz et al. (2009), ambos os autores em seus experimentos utilizaram o sistema de irrigação do tipo pivô central, equipado com aspersor spray de placa oscilante e com condições operacionais semelhantes. No entanto, apesar das características semelhantes dos equipamentos e aspersores de ambos os experimentos, Colombo et al. (2015) encontraram um índice de desempenho para o modelo de Ortiz et al. (2009), segundo Camargo e Sentelhas (1997), classificado como “Mediano” ($c = 0,61$).

O modelo proposto por Sanchez et al. (2011) superestimou as PEA em relação as perdas obtidas por meio dos experimentos de campo e o índice de desempenho foi classificado como “Sofrível”. Sanchez et al. (2011) utilizaram em seus experimentos um sistema de irrigação por aspersão convencional, o qual apresenta características e funcionamento distintos do sistema de irrigação utilizado neste trabalho. As diferenças entre os equipamentos avaliados possivelmente contribuíram para a superestimação das PEA.

O sistema de irrigação por aspersão convencional no estudo de Sanchez et al. (2011) foi equipado com aspersores de impacto com diâmetro de 4,0, 4,4 e 4,8mm operando com pressões de 240, 320 e 420kPa. Os aspersores de impacto possuem design diferenciado em relação ao aspersor I-Wob e apresentam uma forma de aspersão específica, o que provavelmente também causou a superestimação das PEA.

No estudo de Sanchez et al. (2011), o aspersor utilizado possui diâmetro inferior ao deste trabalho. Os pequenos diâmetros de aspersores presentes no sistema de irrigação de Sanchez et al. (2011) geram gotas de menores diâmetros, as quais são facilmente afetadas por fatores externos e, conseqüentemente, há possibilidade de ocorrência de PEA maiores, pois segundo Playán et al. (2005) na irrigação por aspersão as gotas maiores são menos afetadas pelas PEA.

Neste contexto, de acordo com Montero et al. (2003) o aumento da pressão de operação do aspersor eleva a velocidade do jato de água aspergido e conseqüentemente proporciona o aumento da fricção com o ar, causando a desintegração do jato em gotas pequenas. Desta forma, pressões maiores proporcionam a aspersão de gotas menores, as quais causam maiores PEA.

A combinação da elevada pressão de operação com o menor diâmetro de aspersor no estudo de Sanchez et al. (2011), proporcionam gotas de diâmetros pequenos. Estas gotas geradas pelo sistema de irrigação por aspersão utilizado por Sanchez et al. (2003b) proporcionaram maiores PEA, sendo a diferença entre o diâmetro de aspersor e a pressão do sistema em relação ao deste estudo, uma das causas da superestimação das PEA por este modelo.

Deve-se salientar que o modelo de Sanchez et al. (2011) foi desenvolvido para as condições meteorológicas distintas da deste estudo, e que o mesmo tem como variáveis a velocidade do vento e também a temperatura do ar, podendo estes fatores também afetado o ajuste do modelo.

O modelo de Yacoubi et al. (2010) apresentou um ajuste adequado das PEA, em relação aos dados mensurados nos ensaios de campo e o índice de desempenho foi classificado como “Muito Bom”, segundo Camargo e Sentelhas (1997). O modelo de Yacoubi et al. (2010) foi desenvolvido para um sistema de irrigação por aspersão convencional, o qual apresenta características distintas de funcionamento em relação ao deste estudo.

Os experimentos de Yacoubi et al. (2010) foram realizados nas condições meteorológicas da região próxima a Aritana, Tunísia. No entanto, a velocidade do vento durante os ensaios de campo apresentou um intervalo de variação de 0,4 a 6,7m s⁻¹, o qual é similar ao deste trabalho que variou de 0,64 a 6,09m s⁻¹,

o que possivelmente proporcionou PEA semelhantes em ambos os estudos. Desta forma, a variável velocidade do vento foi o fator que proporcionou um ajuste adequado das PEA estimadas do modelo em relação as PEA observadas em campo.

O modelo de Colombo et al. (2015) subestimou as PEA em relação as perdas obtidas por meio dos experimentos de campo e o desempenho do modelo segundo a classificação de Camargo e Sentelhas (1997) foi “Mediano”. O modelo de Colombo et al. (2015) foi desenvolvido nas condições meteorológicas de Bom Sucesso (Minas Gerais), as quais caracterizam-se por apresentar baixas velocidades do vento, sendo o oposto da região deste estudo. A velocidade do vento durante os experimentos de Colombo et al. (2015) variou de 0,07 a 3,34m s⁻¹, sendo este intervalo inferior ao verificado neste estudo que foi de 0,64 a 6,09m s⁻¹. Desta forma, os menores valores de velocidade do vento no estudo de Colombo et al. (2015) possivelmente são responsáveis pela subestimação das PEA.

Os experimentos de Colombo et al. (2015) foram realizados por meio de sistema de irrigação do tipo pivô central, o qual apresenta características distintas do equipamento utilizado neste estudo, podendo este ser outro fator responsável pela inadequação do modelo aos dados deste experimento.

5.3 Variáveis meteorológicas

Na Figura 14 estão plotadas as PEA observadas do sistema lateral móvel de irrigação, em função das variáveis meteorológicas velocidade de vento (V), temperatura (T) e umidade relativa do ar (UR).

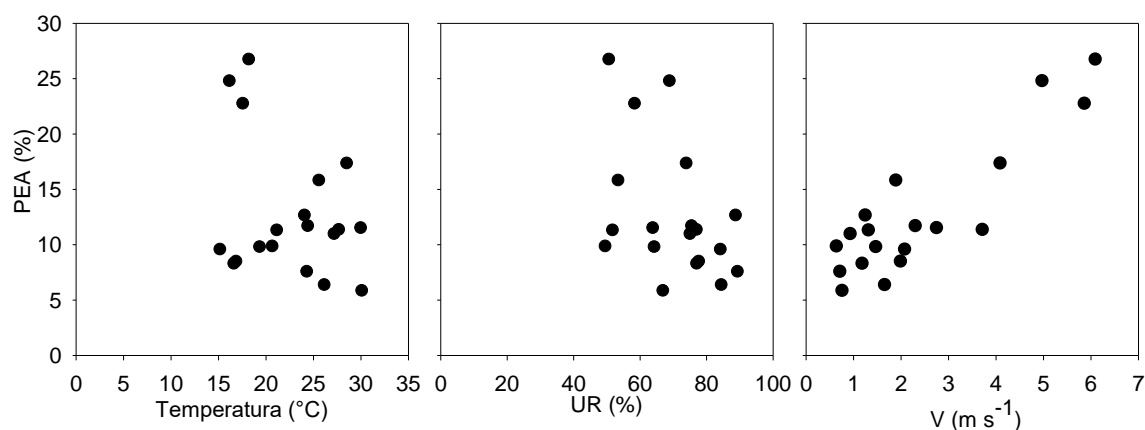


Figura 14 - Variáveis meteorológicas e perdas por evaporação e arraste dos experimentos realizados em campo, por meio do sistema de irrigação lateral móvel.

Pode-se verificar por meio da Figura 14, que as PEA variaram principalmente em função da velocidade do vento. Além disso, percebe-se que o aumento da velocidade do vento durante a realização dos ensaios de campo proporcionou a elevação das PEA. No entanto, as variáveis meteorológicas temperatura e umidade relativa do ar apresentaram uma variação aleatória em relação as PEA observadas.

Visando analisar estatisticamente estas variáveis, aplicou-se o teste t de Student relacionando cada variável meteorológica (velocidade de vento, temperatura e umidade relativa do ar) com as PEA dos ensaios de campo do equipamento lateral móvel. Os resultados do teste t para cada variável meteorológica avaliada e o seu nível de significância estão dispostos na Tabela 5.

Tabela 5 - Resultados do teste estatístico t de Student para cada variável meteorológica monitorada em função das perdas por evaporação e arraste.

Variável	t	P
Velocidade do vento (V)	7,763	0,001*
Umidade relativa do ar (UR)	-2,07	0,054
Temperatura do ar (T)	-1,361	0,191

*significativo a 5% de significância

Pode-se constatar por meio da Tabela 5, que entre as variáveis meteorológicas monitoradas, a velocidade do vento foi a variável mais explicativa

das PEA ao nível de significância de 5%. O que indica que a ocorrência das PEA está relacionada com a velocidade do vento da região deste estudo.

As variáveis meteorológicas umidade relativa e temperatura do ar, conforme Tabela 5, não apresentaram relação significativa com as PEA, sendo assim, estas variáveis não são consideradas representativas e explicativas das PEA. Desta forma, deve-se atentar as velocidades do vento durante a irrigação com o sistema lateral móvel, para que as PEA sejam minimizadas e o manejo da irrigação seja realizado com base nesta variável.

Em estudo semelhante, Pláyan et al. (2005) realizaram experimentos com equipamento lateral móvel e aspersão convencional em Zaragoza (Espanha), os mesmos determinaram as PEA e monitoraram as variáveis meteorológicas velocidade do vento, temperatura, umidade do ar e radiação solar. Os autores aplicaram o teste estatístico t Student entre as PEA e as variáveis meteorológicas, e também obtiveram como variável mais significativa a velocidade do vento.

Ortiz et al. (2009) também desenvolveram um estudo similar utilizando um equipamento de irrigação do tipo pivô central em Albacete (Espanha), os mesmos estimaram as PEA e monitoraram as variáveis meteorológicas velocidade do vento, temperatura e umidade relativa do ar. A análise estatística por meio do teste t de Student também permitiu verificar que a variável mais explicativa das PEA foi a velocidade do vento.

De forma similar, Dechmi et al. (2003b), Playán et al. (2004) e Colombo et al. (2015) determinaram as PEA para diferentes regiões e variáveis meteorológicas, os mesmos também utilizaram a velocidade do vento como variável explicativa na determinação da PEA. Além disso, em alguns casos, como no estudo de Yacoubi et al. (2010), onde verificou-se que duas variáveis meteorológicas eram explicativas das PEA, sendo uma destas a velocidade do vento e outra a umidade relativa do ar.

Desta forma, pode-se verificar que de modo geral, a velocidade do vento é a variável meteorológica que apresenta uma maior relação com a variação das PEA, para diferentes equipamentos de irrigação, modelos de aspersores e também distintas regiões de estudo.

5.4 Modelo proposto para estimativa das perdas por evaporação e arraste do sistema lateral móvel de irrigação

Os resultados apresentados no item 5.1 permitem concluir que dos modelos desenvolvidos para diferentes regiões, condições meteorológicas, equipamentos de irrigação e modelos de aspersores, apenas o modelo de Yacoubi et al. (2010) estimou adequadamente as PEA.

No entanto, devido a inexistência de modelos para estimativa das PEA do equipamento lateral móvel nas condições meteorológicas do Rio Grande do Sul, desenvolveu-se uma equação a partir dos dados de campo obtidos neste trabalho.

A análise estatística por meio do test t de Student indicou a velocidade do vento como variável explicativa das PEA. Desta forma, utilizou-se apenas esta variável na proposição do modelo.

Na equação 9 é apresentado o modelo para a estimativa das PEA gerado para o equipamento lateral móvel de irrigação equipado com aspersores modelo I-Wob operando com uma pressão de 68,9kPa nas condições meteorológicas do sul do Rio Grande do Sul.

$$PEA (\%) = 3,1007 * V + 5,3428 \quad (13)$$

PEA = perdas por evaporação e arraste (%)

V = velocidade do vento (m s⁻¹)

O modelo foi desenvolvido por meio de uma regressão linear, sendo significativo ao nível de 5%. De forma similar, Pláyan et al. (2004; 2005) e Ortíz et al. (2009) também geraram diversos modelos para estimativas de PEA, sendo alguns significativos e outros não. No entanto, os mesmos apresentaram em seus trabalhos apenas os modelos significantes a 5%.

O modelo apresentou como resultado um coeficiente R = 0,78, o qual é considerado elevado e indica que o mesmo ajustou-se adequadamente. A

análise do coeficiente de regressão como parâmetro indicativo de um bom ajuste foi baseada na metodologia dos autores Playán et al. (2004, 2005) e Ortíz et al. (2009), os quais avaliaram a aplicabilidade dos seus modelos por meio do resultado deste coeficiente.

5.5 Perdas por evaporação e arraste do sistema lateral móvel de irrigação equipado com aspersores instalados a diferentes alturas

Na Tabela 6 estão apresentados os resultados das PEA dos 11 ensaios de campo realizados com os aspersores instalados no segundo vão a 1,3m e no quarto vão a 2,1m de altura em relação a borda do coletor, juntamente com as variáveis meteorológicas velocidade do vento (V), umidade relativa (UR) e temperatura do ar (T).

Tabela 6 - Resultados das perdas por evaporação e arraste dos aspersores instalados a 1,3m e 2,1m em relação a borda do aspersor, e variáveis meteorológicas monitoradas durante a realização dos ensaios de campo.

Data	T (°C)	UR (%)	V (m s ⁻¹)	PEA (%) 1,3m	PEA (%) 2,1m
26/04/2014	19,61	70,18	1,61	16,20	24,73
26/04/2014	21,62	49,57	1,62	13,90	15,89
26/04/2014	21,91	52,64	3,45	23,55	18,86
26/04/2014	22,35	51,79	3,65	13,36	4,91
26/04/2014	21,33	53,48	3,86	16,51	13,16
09/05/2015	16,64	93,13	3,24	7,38	9,39
17/05/2014	15,87	90,36	2,37	10,94	21,49
17/05/2014	17,70	86,14	2,52	13,00	9,16
20/05/2014	14,30	87,82	1,22	9,21	7,04
20/05/2014	12,62	92,57	1,63	12,33	19,79
20/05/2014	13,88	90,33	1,76	4,26	2,64
Média	17,99	74,37	2,45	12,79	13,37
Desvio médio	3,07	17,12	0,81	3,60	6,17

T – Temperatura, UR – Umidade Relativa do ar e V – velocidade do vento.

Pode-se visualizar na Tabela 6 que a velocidade do vento durante os ensaios de campo variou de 1,22 a 3,86m s⁻¹, sendo a velocidade média 2,45 m s⁻¹. A umidade relativa do ar variou de 49,57 a 87,82%, com valor médio de

74,37%. A temperatura manteve-se no intervalo de 14,30 a 22,35°C, com média de 17,99°C. As PEA do aspersor instalado a 1,3m variaram de 4,26 a 23,55%, com uma média de 12,79%. E as PEA do aspersor instalado a 2,1m permaneceram no intervalo de 2,64 a 24,37%, com um valor médio de 13,37%.

Verifica-se por meio da Tabela 6, que na maioria dos ensaios, as PEA foram menores para os aspersores instalados a uma altura de 1,3 m em relação a borda do coletor. Desta forma, visando-se minimizar as PEA durante a irrigação com o sistema lateral móvel, possivelmente os emissores devem ser instalados a 1,3 m de altura em relação a borda do coletor, porém para verificar se estas diferenças são significativas aplicou-se o teste tukey entre os resultados das PEA.

Na maioria dos ensaios realizados com os aspersores instalados na altura de 1,3m e 2,1m de altura da borda do coletor, as elevadas velocidades do vento causaram maiores PEA. No entanto, as variáveis meteorológicas umidade relativa e temperatura do ar não apresentaram uma relação com as PEA dos aspersores.

Na Figura 15 são apresentadas as perdas de água por evaporação e arraste para os aspersores instalados nas alturas de 1,3 e 2,1m de altura em relação a borda do coletor.

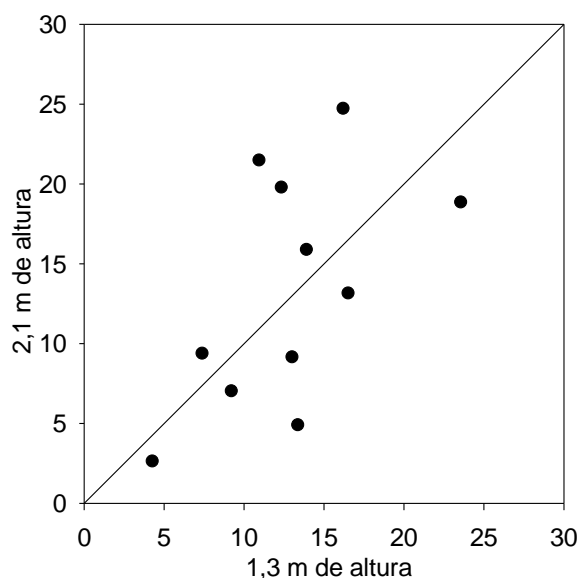


Figura 15 - Resultados das perdas por evaporação e arraste observadas para os aspersores instalados a 1,3m versus 2,1m de altura em relação a borda do coletor.

Pode-se verificar por meio da Figura 15 que os resultados das PEA das alturas de 1,3m e 2,1m aproximaram-se da reta 1:1, o que indica que as mesmas apresentaram um comportamento semelhante e que possivelmente não há diferenças significativas entre as PEA das alturas.

Visando-se analisar estatisticamente os resultados das PEA das diferentes alturas, e seguindo recomendações de Pinto et al. (2006), aplicou-se o teste Tukey nos dados apresentados na Figura 15. Desta forma, na Tabela 7 estão dispostos os resultados do teste Tukey e das PEA médias da altura de 1,3m e 2,1m em relação a borda do coletor.

Tabela 7 - Resultados do teste estatístico Tukey aplicado entre as perdas por evaporação e arraste dos aspersores instalados a 1,3 e 2,1m de altura em relação a borda do coletor.

Altura (m)	PEA Média (%)	Grupo
1,3	12,79	a
2,1	13,37	a

*significativo a 5% de probabilidade

Pode-se visualizar na Tabela 7 que as diferentes alturas de aspersores proporcionaram PEA médias semelhantes. Além disso, verifica-se também que o menor resultado de PEA média foi obtido com aspersor localizado a 1,3m de altura, o que indica que esta apresentou um melhor desempenho, possivelmente associado a proximidade do aspersor à superfície do solo. No entanto, o teste tukey classificou as PEA médias das alturas no mesmo grupo (grupo a), indicando que as mesmas não apresentam diferenças significativas ao nível de 5% de significância.

Resultados similares foram obtidos por Playán et al. (2004), os quais realizaram experimentos em Zaragoza (Espanha) por meio de uma máquina experimental que simula a operação de um sistema mecanizado de irrigação do tipo pivô central, onde os emissores foram posicionados a 1,0m e 2,4m de altura da superfície do solo. De acordo com os autores, as linhas de regressão resultantes das PEA das alturas não foram significativamente diferentes, e, portanto, não se pôde concluir (com o conjunto de dados disponíveis) se a diminuição da altura dos aspersores proporciona uma redução na PEA.

No entanto, Ortíz et al. (2009) realizaram experimentos por meio de um sistema de irrigação por pivô central nas condições meteorológicas de Albacete (Espanha), com os aspersores instalados a 1,0 e 2,5m de altura da superfície do solo, os mesmos verificaram diferenças significativas entre estas duas alturas. Os autores constataram que as PEA durante o dia podem ser reduzidas em cerca de 33,0%, quando o mesmo tipo de aspersor é fixado 1,0m acima da superfície do solo ao invés 2,5m.

Desta forma, percebe-se que a influência da altura do aspersor em relação a superfície do solo também pode estar relacionada com as condições meteorológicas de cada local. Nesse contexto, na Figura 16 é apresentada as PEA observadas dos aspersores instalados a 1,3 e 2,1m de altura em relação a borda coletor, em função da velocidade do vento monitorada durante os ensaios de campo.

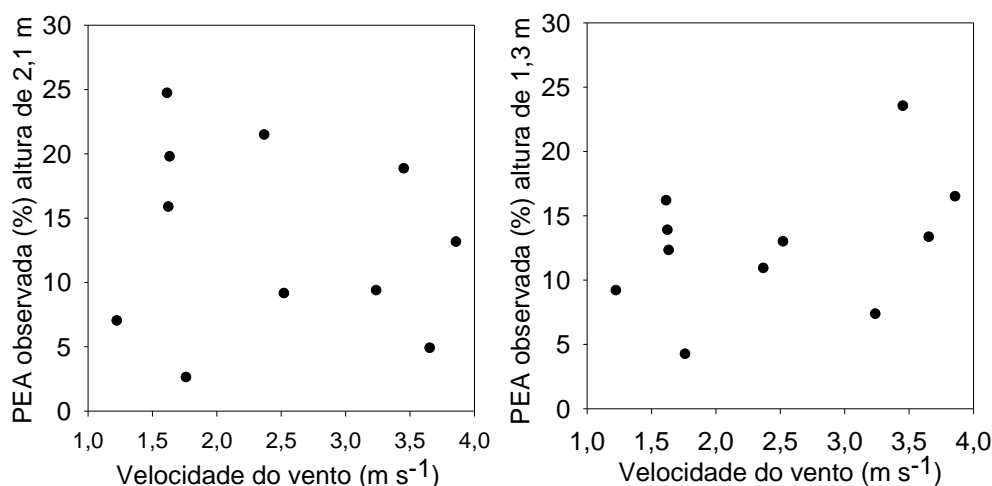


Figura 16 - Resultados das PEA observadas dos aspersores instalados a 1,3m e 2,1m de altura em relação a borda do coletor em função da velocidade do vento.

Verifica-se que as PEA observadas na altura de 1,3m exibiram uma determinada tendência nos resultados, apresentando, de modo geral, uma elevação das PEA com o aumento da velocidade do vento. O comportamento das PEA em relação a velocidade do vento pode ser melhor delineado na altura de 1,3m, possibilitando definir em qual velocidade de vento é mais adequado irrigar, diferentemente do aspersor instalado na altura de 2,1m da borda do coletor. Desta forma, apesar das alturas não possuírem diferenças significativas

em relação as PEA, os resultados indicam que a instalação do aspersor a 1,3m de altura, possibilitará o manejo do equipamento durante a irrigação de acordo com a velocidade do vento.

No entanto, deve-se salientar que em relação as PEA médias, os aspersores poderiam ser instalados em ambas alturas, pois apresentam resultados similares. Além disso, constatou-se que não é necessária a geração de um modelo específico para cada altura de aspersor, sendo possível utilizar o modelo gerado no item 5.4 para estimava das PEA das diferentes alturas.

5.6 Perdas por evaporação e arraste do sistema lateral móvel de irrigação equipado com diferentes tipos de aspersores

Na Tabela 8 estão dispostos os resultados das PEA dos aspersores ensaiados I-Wob e Super Spray e as variáveis meteorológicas velocidade do vento (V), umidade relativa (UR) e temperatura do ar (T), monitoradas durante os 10 ensaios de campo realizados.

Tabela 8 - Resultados das perdas por evaporação e arraste dos aspersores I-Wob e Super Spray e das variáveis meteorológicas monitoradas durante os ensaios de campo.

Data	T (°C)	UR (%)	V (m s ⁻¹)	PEA Super Spray (%)	PEA I-Wob (%)
23/01/2015	25,16	68,29	4,29	7,35	8,87
09/02/2015	29,45	62,12	1,12	13,69	10,92
11/04/2015	27,36	59,65	2,81	21,97	12,13
11/04/2015	28,83	52,88	4,12	17,58	7,19
24/04/2015	24,31	60,90	2,48	26,53	4,33
25/04/2015	15,95	85,57	0,06	9,03	4,04
25/04/2015	17,60	83,88	0,40	12,27	2,97
15/05/2015	22,20	82,13	3,15	12,85	18,69
22/05/2015	25,65	70,60	1,23	14,98	11,81
22/05/2015	27,41	64,38	1,91	14,68	11,21
Média	24,39	69,04	2,16	15,09	9,21
Desvio Médio	3,50	9,20	1,21	4,16	3,74

T – Temperatura, UR – Umidade Relativa do ar e V – velocidade do vento.

Pode-se verificar na Tabela 8 que durante os ensaios de campo a velocidade do vento variou de 0,06 a 4,29m s⁻¹. A temperatura do ar variou de 15,95 a 25,16°C, com média de 24,39°C. A umidade relativa do ar manteve-se no intervalo de 52,88 a 69,04%, com valor médio de 69,04%. Os resultados das PEA do aspersor I-Wob variaram de 2,97 a 18,69%, com valor médio de 9,21%. E as PEA do aspersor Super Spray variaram de 7,35 a 26,53%, com valor médio de 15,09%.

Os aspersores Super Spray apresentaram maiores resultados de PEA em relação aos emissores I-Wob. Além disso, pode-se visualizar na Tabela 8, que as PEA dos aspersores variaram em função da velocidade do vento. No entanto, as variáveis temperatura e umidade relativa do ar não influenciaram os resultados das PEA dos diferentes tipos de aspersores.

Na Figura 17 estão os resultados das PEA observadas para os modelos de aspersores Super Spray e I-Wob.

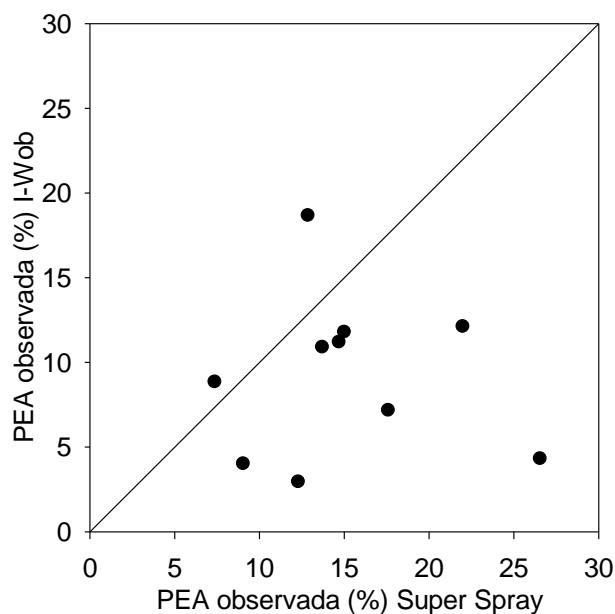


Figura 17 - Resultados das PEA observadas dos aspersores Super Spray versus I-Wob.

Verifica-se por meio da Figura 17 que os resultados das PEA observadas de ambos aspersores não apresentaram uma variação similar e possivelmente possuem comportamentos distintos em relação as PEA. Além disso, pode-se visualizar que as PEA concentraram-se próximo ao eixo das abscissas onde

estão plotados os resultados dos aspersores Super Spray, o que possivelmente está atribuído ao fato dos aspersores I-Wob apresentaram menores PEA.

A análise estatística dos resultados das PEA dos modelos de aspersores I-Wob e Super Spray, apresentados na Figura 17, foi realizado por meio do teste Tukey. Os resultados das PEA médias de cada um dos aspersores estão dispostos na Tabela 9, juntamente com a classificação do teste Tukey.

Tabela 9 - Resultados do teste estatístico Tukey aplicado entre as perdas por evaporação e arraste dos aspersores Super Spray e I-Wob.

Aspersor	PEA Média (%)	Grupo
Super Spray	15,09	a
I-Wob	9,21	b

Pode-se verificar por meio da Tabela 9 que o modelo de aspersor Super Spray apresentou PEA média superior ao aspersor I-Wob. Além disso, o resultado do teste Tukey classificou as PEA médias em dois grupos, indicando que há diferenças significativas entre as PEA dos dois modelos de aspersores ao nível de 5% de significância.

A Figura 18 apresenta todos resultados das PEA observadas dos aspersores Super Spray e I-Wob em função da velocidade do vento.

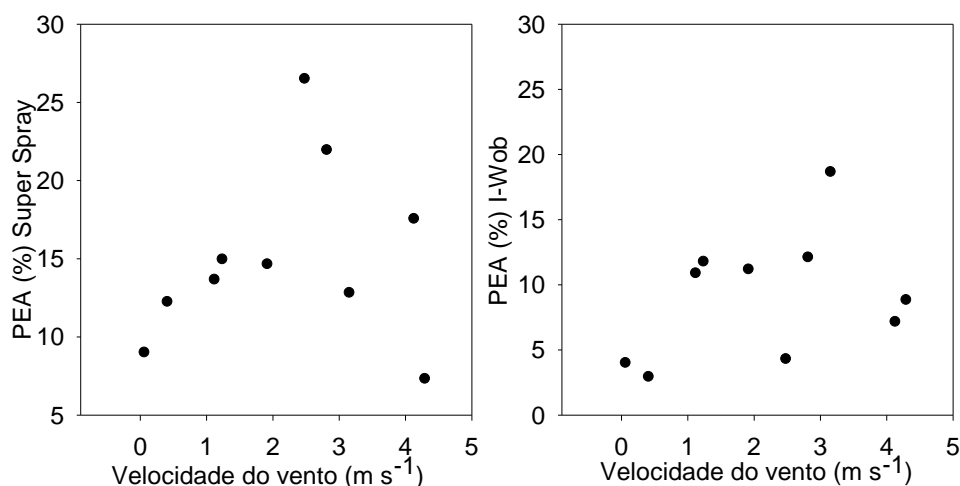


Figura 18 - Resultados das PEA observadas dos aspersores Super Spray e I-Wob em função da velocidade do vento.

Pode-se verificar que os aspersores I-Wob apresentaram menores resultados de PEA em relação aos aspersores Super Spray, sendo mais eficientes em condições de elevadas velocidades do vento. Este resultado pode estar associado ao fato dos aspersores do modelo I-Wob caracterizaram-se por emitir gotas com diâmetro maior que o Super Spray, pois, de acordo Playán et al. (2005), na irrigação por aspersão, as gotas maiores são mais resistentes à deriva do vento e apresentam menor área por unidade de massa, como consequência, são menos afetadas pelas PEA.

Verifica-se também por meio da Figura 18 que as PEA observadas do aspersor I-Wob demonstraram uma relação maior com a velocidade do vento do que as PEA observadas para o aspersor Super Spray. Desta forma, é recomendada a utilização dos aspersores I-Wob nas condições meteorológicas do RS, pois os mesmos apresentaram menores PEA e assim evitam o desperdício de água.

Estes resultados são semelhantes aos obtidos por Faci et al. (2001), os quais também verificaram uma melhor relação entre a velocidade do vento e as PEA para aspersores spray placa oscilante do que para os aspersores spray placa fixa.

No entanto, no estudo de Playán et al. (2004), as PEA dos aspersores com spray placa fixa não puderam ser relacionadas com a velocidade do vento, devido à dificuldade de reprodução do volume de coleta de irrigação neste tipo de pulverizador e a baixa variação da velocidade do vento durante os experimentos. Já no caso dos aspersores spray placa oscilante, um modelo de regressão linear com base na velocidade do vento explicou 57,0% da variabilidade da PEA.

Desta forma, verifica-se que em diferentes estudos, a variável velocidade do vento é explicativa das PEA somente para aspersores spray placa rotativa e oscilante. No entanto, neste trabalho, a velocidade do vento também apresentou uma influência significativa em relação ao aspersor Super Spray.

5.7 Perdas por evaporação e arraste do sistema lateral móvel equipado com aspersores Super Spray

Os resultados apresentados no item 5.6 permitiram verificar que os modelos de aspersores I-Wob e Super Spray apresentaram diferenças significativas ao nível de 5% de significância. Desta forma, constatou-se a necessidade de comparar as PEA observadas do aspersor Super Spray, com as PEA estimadas a partir de diferentes modelos presentes literatura. Visando identificar se algum dos modelos adequa-se aos dados deste estudo e se pode ser utilizado na estimativa das PEA do aspersor Super Spray nas condições meteorológicas do sul do Rio Grande do Sul.

Na Figura 19 estão as PEA observadas do modelo de aspersor Super Spray em função das PEA estimadas por meio dos diferentes modelos.

Pode-se verificar por meio da Figura 19 que as PEA estimadas por meio do modelo de Faci et al. (2001) foram classificadas de acordo com o índice de Camargo e Sentelhas (1997) como “Péssimo” ($c = 0,15$).

Faci et al (2001) utilizaram uma estrutura experimental metálica para realização dos ensaios de campo, a qual continha apenas um aspersor instalado, sendo diferente do equipamento utilizado neste estudo. Além disso, um único aspersor instalado, em um sistema de irrigação, não propicia a geração de um microclima, o que pode ter causado maiores perdas segundo Ortega et al. (2000) e influenciado o ajuste do modelo.

As condições meteorológicas de Zaragoza onde foi realizado o estudo de Faci et al. (2001) são distintas da região sul do RS, o que também pode ter afetado a estimativa das PEA.

As PEA estimadas pelo modelo de Dechmi et al. (2003b) resultaram em um índice de Camargo e Sentelhas (1997) classificado como “Péssimo” ($c = 0,09$), o desempenho inadequado do modelo pode ser atribuído ao tipo de equipamento utilizado, o qual foi um sistema de irrigação por aspersão convencional, sendo diferente do equipamento deste estudo.

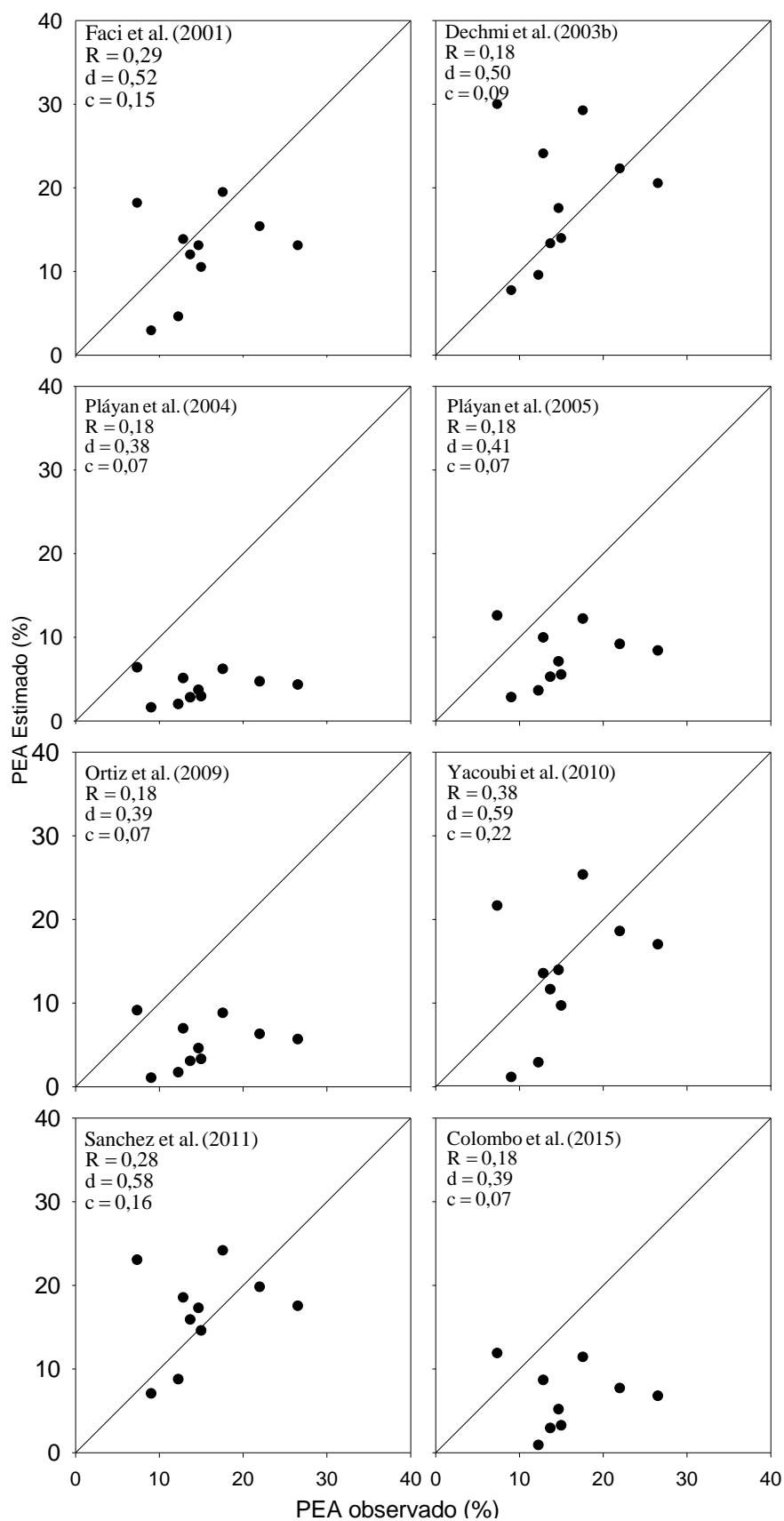


Figura 19 - Resultados das PEA observadas do aspersor Super Spray em função das PEA estimadas com os modelos presentes na literatura.

No sistema de irrigação por aspersão convencional utilizado por Dechmi et al. (2003b) foram instalados aspersores de impacto, os quais apresentam características de funcionamento distintas em relação ao aspersor Super Spray. Os aspersores no estudo de Dechmi et al. (2003b) possuem diâmetro de 4,4 x 2,4mm, sendo inferior ao diâmetro de 6,35mm utilizado neste estudo. Além disso, a pressão de operação durante os experimentos foi mantida em 300kPa, sendo consideravelmente superior a pressão de operação de 68,9kPa.

A maior pressão de operação dos aspersores faz com que as gotas sejam aspergidas em alta velocidade e devido o atrito com ar são fracionadas em gotas menores segundo Montero et al. (2003). Além disso, pequenos diâmetros de aspersores geram gotas menores, as quais são mais suscetíveis as PEA segundo Pláyan et al. (2005). Desta forma, a maior pressão de operação e o menor diâmetro do aspersor possivelmente proporcionaram a aspersão gotas de diâmetros pequenos, as quais causaram maiores PEA e consequentemente influenciaram no ajuste do modelo de Dechmi et al. (2003b) aos dados deste trabalho.

Deve-se ressaltar também, que as condições meteorológicas da região onde foram realizados os experimentos de Dechmi et al. (2003b) são distintas da região sul do Rio Grande do Sul e também afetaram o ajuste do modelo.

O modelo de Pláyan et al. (2004), de modo geral, subestimou as PEA em relação as PEA observadas do aspersor Super Spray, sendo o índice de desempenho de Camargo e Sentelhas (1997) classificado como “Péssimo” ($c = 0,07$). Playán et al. (2004) realizaram os ensaios de campo a partir de uma máquina experimental que simula um sistema de irrigação do tipo pivô central, a qual possui funcionamento distinto do equipamento deste estudo, sendo este um dos fatores que afetou o ajuste do modelo.

Nos experimentos de Playán et al. (2004) foram utilizados aspersores do tipo spray placa rotativa e I-Wob, estes possuem características diferentes de aplicação de água em relação ao aspersor Super Spray. Neste sentido, Ortíz et al. (2009) concluíram que as PEA durante a irrigação foram aproximadamente 10,0% menores para os aspersores do tipo spray placa rotativa do que para os

aspersores spray placa fixa. Desta forma, provavelmente os aspersores no estudo de Playán et al. (2004) proporcionaram menores PEA comparadas a este trabalho e consequentemente causaram a subestimação das PEA em relação as PEA observadas.

As condições meteorológicas da região de Zaragoza (Espanha), onde foram realizados os ensaios de campo de Pláyan et al. (2004), diferem-se da deste estudo, o que possivelmente também influenciou o ajuste do modelo.

Resultados semelhantes foram obtidos por Playán et al. (2005), sendo que o modelo Playan et al. (2004) também subestimou as PEA em relação as PEA observadas de Playán et al. (2005). Os autores afirmam que a má performance do modelo está relacionada com as variáveis do sistema de irrigação, ou com erros de medição.

O modelo de Pláyan et al. (2005), de modo geral, subestimou as PEA em relação as PEA observadas do aspersor Super Spray, sendo o índice de desempenho de Camargo e Sentelhas (1997) classificado como “Péssimo” ($c = 0,07$). O modelo de Playán et al. (2005) foi desenvolvido por meio de experimentos realizados em uma máquina experimental que simula um sistema lateral móvel, a qual apresenta características específicas, porém o funcionamento é semelhante ao equipamento avaliado neste trabalho. No entanto, por ser uma máquina experimental pode apresentar algumas particularidades, as quais influenciaram o ajuste do modelo.

A máquina experimental utilizada por Playán et al. (2005) foi equipada com aspersores spray placa rotativa, os quais caracterizam-se por apresentar menores PEA, como verificado no estudo de Ortiz et al. (2009). Desta forma, os aspersores spray placa rotativa proporcionaram menores PEA em relação a este trabalho, o que resultou na subestimação das PEA.

As condições meteorológicas da região onde foram realizados os ensaios de campo de Playán et al. (2005) são distintas da deste trabalho, o que também pode ter afetado o ajuste do modelo.

Resultados semelhantes foram obtidos por Colombo et al. (2015), os quais também encontraram uma inadequação dos modelos de Pláyan et al. (2004, 2005) com índice de Camargo e Sentelhas (1997) classificado como

“Mau” e “Sofrível”. Colombo et al. (2015) atribuíram a inadequação do modelo as diferentes condições meteorológicas de cada região, pois o estudo de Colombo et al. (2015) foi desenvolvido em uma região com baixas velocidades do vento, sendo o oposto das velocidades predominantes em Zaragoza, onde foram realizados os experimentos de Pláyan et al. (2004, 2005). Além disso, os mesmos também salientam que Pláyan et al. (2004; 2005) utilizaram uma máquina experimental, o qual apresenta particularidades e também distintas condições de operação.

As PEA de modo geral foram subestimadas pelo modelo de Ortíz et al. (2009), sendo o índice de Camargo e Sentelhas (1997) classificado como “Péssimo” ($c = 0,07$). A inadequação do modelo pode estar associada ao sistema utilizado por Ortíz et al. (2009), o qual foi um sistema do tipo pivô central, sendo diferente do utilizado neste trabalho.

No equipamento pivô central os aspersores foram distanciados em 1,6m, este espaçamento é inferior ao de 2,3m configurado neste trabalho. O menor espaçamento possibilita a instalação de um número maior de aspersores, o que facilita o desenvolvimento de um microclima durante a irrigação. Este microclima segundo Ortega et al. (2000) provoca a redução das PEA, sendo possivelmente o que ocorreu durante os experimentos de campo de Ortíz et al. (2009). Desta forma, as menores PEA nos experimentos de Ortíz et al. (2009) causaram a subestimação das PEA em relação as observadas.

Os aspersores nos experimentos de Ortíz et al. (2009) foram instalados a 1m de altura da superfície do solo, sendo esta altura inferior a 2,1m em relação a borda do coletor utilizada neste trabalho. A menor altura do aspersor em relação a superfície do solo proporciona a redução das PEA, segundo Ortíz et al. (2009), as perdas durante o dia podem ser reduzidas em cerca de 33,0%, quando o mesmo tipo de aspersor é fixado 1,0m acima da superfície do solo ao invés 2,5m. Desta forma, as menores PEA do modelo de Ortíz et al. (2009) contribuíram para a subestimação das PEA.

É necessário ressaltar que os experimentos de Ortíz et al. (2009) foram realizados nas condições meteorológicas de Albacete (Espanha), as quais

apresentam características particulares, distintas da região sul do Rio Grande do Sul.

O modelo Yacoubi et al. (2010) apresentou um ajuste inadequado das PEA estimadas em relação as PEA observadas, sendo classificado como “Péssimo” ($c = 0,22$), de acordo, com o índice de Camargo e Sentelhas (1997).

O principal fator a influenciar o ajuste do modelo foi a velocidade do vento, a qual apresentou um intervalo de variação de 0,5 a 6,1 m s^{-1} nos ensaios de Yacoubi et al. (2010), sendo superior a monitorada, neste trabalho, durante os ensaios dos aspersores Super Spray, a qual variou de 0,06 a 4,29 m s^{-1} . Além disso, pode-se verificar que para os aspersores Super Spray o modelo apresentou um ajuste “Péssimo” e quando utilizado para estimar as PEA dos emissores I-Wob resultou em um índice de desempenho “Muito Bom”, sendo a principal diferença entre os experimentos a velocidade do vento. Desta forma, percebe-se que a velocidade do vento é um dos fatores fundamentais para o ajuste adequado do modelo.

No sistema de irrigação por aspersão convencional utilizado por Yacoubi et al. (2010) foram instalados aspersores de impacto, os quais possuem design específico e, conseqüentemente, permitem a aplicação de água de forma diferenciada em relação ao aspersor Super Spray.

O diâmetro do aspersor utilizado nos experimentos de Yacoubi et al. (2010) foi 4,5mm, atuando com uma pressão de operação de 300kPa. No estudo de Yacoubi et al. (2010) o diâmetro de aspersor é inferior ao deste trabalho e a pressão de operação superior, a associação destes parâmetros afetou as PEA e, conseqüentemente, o ajuste do modelo.

As PEA estimadas pelo modelo de Sanchez et al. (2011) não apresentaram um ajuste adequado em relação as PEA observadas. O índice de desempenho do modelo foi classificado como “Péssimo” ($c = 0,16$). Este resultado provavelmente está associado ao sistema de irrigação por aspersão convencional utilizado por Sanchez et al. (2011), o qual apresenta funcionamento distinto do sistema lateral móvel de irrigação deste trabalho.

O sistema de irrigação por aspersão convencional no estudo de Sanchez et al. (2011) foi equipado com aspersores de impacto, os quais possuem

características específicas e diferente forma de aplicação de água em relação ao aspersor Super Spray. Os diâmetros de aspersores utilizados por Sanchez et al. (2011) foram 4,0, 4,4 e 4,8mm e as pressões de operação avaliadas foram 240, 320 e 420kPa. Desta forma, possivelmente o diferente tipo de aspersor, os menores diâmetros e a maior pressão de operação foram os principais fatores responsáveis pelas diferenças entre as PEA estimadas por meio do modelo de Sanchez et al. (2011) e as observadas neste trabalho.

As condições meteorológicas da região onde foram realizados os experimentos de Sanchez et al. (2011) são distintas da região deste estudo, o que possivelmente também afetaram o ajuste do modelo.

O modelo de Colombo et al. (2015) subestimou as PEA em relação as PEA observadas, sendo o índice de Camargo e Sentelhas (1997) classificado como “Péssimo” ($c = 0,07$), as diferenças nos resultados podem ser atribuídas as condições meteorológicas de Bom Sucesso (Minas Gerais), as quais caracterizam-se por apresentar baixas velocidades do vento, sendo o oposto da região deste estudo.

O sistema de irrigação utilizado por Colombo et al. (2015) foi um sistema de irrigação do tipo pivô central, o qual apresenta funcionamento distinto do equipamento lateral móvel. O sistema pivô central foi equipado com aspersores do tipo I-Wob, os quais de modo geral apresentam menor PEA em relação ao aspersor Super Spray, o que possivelmente afetou o ajuste do modelo de Colombo et al. (2015) em relação aos dados deste estudo.

Pôde-se verificar por meio dos resultados apresentados anteriormente, que os modelos presentes na literatura não estimaram adequadamente as PEA dos aspersores Super Spray nas condições meteorológicas do sul do Rio Grande do Sul.

5.8 Modelo proposto para o sistema lateral de irrigação equipado com aspersores Super Spray

Os resultados apresentados no item 5.7 permitiram verificar que os modelos desenvolvidos para distintas condições meteorológicas, diferentes

equipamentos de irrigação e aspersores, não são adequados para estimar as PEA proporcionadas pelos aspersores Super Spray quando instalados no sistema mecanizado de irrigação tipo lateral móvel. Desta forma, constou-se a necessidade de gerar-se um modelo específico para estimativa da PEA de aspersores modelo Super Spray.

A análise estatística por meio do test t de Student realizada no item 5.2, permitiu verificar que a variável explicativa das PEA foi a velocidade do vento. Desta forma, utilizou-se apenas a velocidade do vento no desenvolvimento do modelo para estimativa das PEA.

Na equação 10 está o modelo para estimativa das PEA gerado para o equipamento lateral móvel de irrigação equipado com aspersores Super Spray operando com uma pressão de 68,9kPa nas condições meteorológicas do sul do Rio Grande do Sul.

$$PEA (\%) = 0,703 * V + 13,575 \quad (14)$$

PEA = perdas por evaporação e arraste (%)

V = velocidade do vento (m s^{-1})

O modelo apresentou como resultado um coeficiente $R = 0,0324$, o qual é considerado baixo e representa um ajuste menos satisfatório. A análise do coeficiente de regressão como parâmetro indicativo de um bom ajuste foi baseada na metodologia dos autores Playán et al. (2004, 2005) e Ortíz et al. (2009), os quais avaliaram a aplicabilidade dos seus modelos por meio do resultado deste coeficiente.

6 Conclusões

1. O sistema mecanizado de irrigação do tipo lateral móvel equipado com aspersores do tipo I-Wob, apresentou perdas por evaporação e arraste variando entre 5,86 a 26,75%, com valor médio de 12,79%.

2. A velocidade do vento é a variável explicativa das PEA para as condições meteorológicas do sul do Rio Grande do Sul. As variáveis temperatura e a umidade relativa do ar não afetaram significativamente as PEA.

3. Os modelos existentes na literatura aplicados para estimativa das PEA, de modo geral, não se ajustaram ou apresentaram pouca adequação aos dados de PEA observados no sul do Rio Grande do Sul.

4. O modelo de Yacoubi et al. (2010) apresentou um ajuste muito bom em relação aos dados observados em campo, o qual pode ser atribuído à amplitude da velocidade do vento durante a realização dos ensaios de campo.

5. O modelo gerado para o sistema lateral móvel equipado com aspersores I-Wob apresentou um elevado coeficiente de regressão e pode ser utilizado para estimativa das PEA nas condições meteorológicas do sul do Rio Grande do Sul.

6. Na análise dos aspersores dispostos a diferentes alturas, a PEA média dos aspersores I-Wob instalados a 1,3m de altura da borda do coletor foi 12,79% e a 2,1m de altura da borda do coletor foi 13,37%.

7. Os aspersores instalados nas alturas de 1,3 e 2,1m da borda do coletor não apresentaram diferenças significativas em relação as PEA médias.

8. Os modelos de aspersores I-Wob e Super Spray apresentaram diferenças significas entre os resultados das PEA, sendo a PEA média do modelo I-Wob igual a 9,0% e do modelo Super Spray igual a 14,25%

Referências

AMBUS, J. V.; PINTO, M. A. B.; PARFITT, J. M. B.; SCIVITTARO, W. B.; TIMM, L. C.; DUTRA, A. D. Rendimento do arroz irrigado por aspersão em função da disponibilidade hídrica e da fertilidade do solo. In: CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS, 21., 2013, Pelotas. **Anais...**Pelotas: UFPel, 2013.

AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERING. **ASAE Standard 436.1**. MAYO, 2001, (R2007). Test procedure for determining the uniformity of water distribution of center pivot and lateral move irrigation machines equipped with spray or sprinkler nozzles.

ANDRADE, C. de L. T. de; BORGES JUNIOR, J. C. F. Seleção do método de irrigação. In: ALBUQUERQUE, P. E. P. de; DURÃES, F. O. M. **Uso e manejo de irrigação**. Brasília: Embrapa, 2008. p. 71 - 143.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14244**: equipamentos de irrigação mecanizada – Pivô central e lateral móvel providos de emissores fixos ou rotativos – determinação da uniformidade de distribuição de água. Rio de Janeiro, dez. 1998. 11 p.

BARBOSA, D. de P.; CASTRO, A. P. de; PARFITT, J. M.; HEINEMANN, A. B.; SILVA, S. C. da. Avaliação de cultivares de arroz irrigado em condições de cultivo de terras altas sob irrigação por aspersão. In: CONGRESSO DE ARROZ IRRIGADO, 8., 2013, Santa Maria. **Anais...** Brasília: Sosbai, 2013.

BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de Irrigação**. 8. ed. Viçosa: UFV, 2006. 625 p.

BESKOW, S.; FARIA, L. C.; COLOMBO, A.; MOURA, D. M. C. de. Modelagem das perdas de água por evaporação e arraste em aspersores de média pressão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.15, n.3, p.221–228, jan. 2011.

BESKOW, S.; COLOMBO, A.; RIBEIRO, M. S.; FERREIRA, L. S.; ROSSI, R.. Simulação das perdas de água por evaporação e arraste, no aspersor NY-7 (4,6 mm x 4,0 mm), em sistemas de aspersão convencional. **Engenharia Agrícola**, v.28, n.3, p.427-437, jul./set. 2008.

CAMARGO, A. P. DE; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.5, n.1, p.89-97, maio 1997.

CHAGAS NETA, M. C. NÖRENBERG, B. G.; BESKOW, S.; PARFITT, J. M. B.; TIMM, L. C.; FARIA, L. C. Avaliação da uniformidade de distribuição em cada vão de um equipamento linear móvel de irrigação. In: CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS, 22., 2014. **Anais...** Pelotas: UFPel, 2014.

CHRISTIANSEN, J. E. **Irrigation by sprinkling**. California: University of California, 1942.

CHRISTOFIDIS, D. Água na produção de alimentos: o papel da academia e da indústria no alcance do desenvolvimento sustentável. **Revista Ciências Exatas**, Taubaté, v. 12, n. 1, p. 37– 46, 2006.

CLARK, G. A.; SRINIVAS, K.; ROGERS, D. H.; STRATTON, R.; MARTIN, V. L. Measured and simulated uniformity of low drift nozzle sprinklers. **American Society of Agricultural Engineers**, v. 46, n. 2, p. 321–330, jan. 2003.

CONCENÇO, G.; BATALHA, B.R.; LARUE, J.L.; GALON, L.; TIRONI, S.P.; MANTOVANI, E.C.; ROLFES, C.R.; SILVA, A.A. Eficiência do uso da água na produção de arroz sob irrigação mecanizada ou inundação. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ARROZ IRRIGADO, 6., **Anais...** Porto Alegre: IRGA, 2009.

COLOMBO, A.; FARIA, L. C.; SILVA JUNIOR, J. J. da.; SANT'ANA, J. A. do V. Modelagem das perdas de água por evaporação e arraste de sprays de placa oscilante. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.19, n.8, p.719–726, 2015.

CRIDDLE, W. D.; DAVIS, S.; PAIR, C. H.; SHUCKELY, D. G. **Methods for evaluation irrigation systems**. Washington: USDA, 1956. 24 p.

CUNHA, D. A.; COELHO, A. B.; FÉRES, J. G. Irrigação como estratégia de adaptação de pequenos agricultores às mudanças climáticas: aspectos econômicos. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 51, n. 2, p. 369 - 386, jul. 2013.

DECHMI, F.; PLAYÁN, E.; CAVERO, J. FACI, J. M.; MARTÍNEZ-COB, A. Wind effects on solid set sprinkler irrigation depth and yield of maize (*Zea mays*). **Irrigation Science**, v. 22, p. 67-77, jun. 2003a.

DECHMI, F.; PLAYÁN, E.; FACI, J.M; TEJERO, M.; BERCERO, A. Analysis of an irrigation district in northeastern Spain II. Irrigation evaluation, simulation and scheduling. **Agricultural Water Management**, v. 61, p. 93-109, dec. 2003b.

DUKES, M. D. Effect of wind speed and pressure on linear move irrigation system uniformity. **Applied engineering in agriculture**, Saint Joseph, v. 22, n. 4, p. 541-548, 2006.

FACI, J. M.; SALVADOR, R.; PLAYÁN, E.; ASCE, A. M.; SOURELL, H. Comparison of fixed and rotating spray plate sprinklers. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.127, p.224-233, jul./aug. 2001.

GIACOMELI, R.; SANTOS, A. T. L.; MACHADO, G. A.; SILVA NETO, G. F. da; ALBERTO, C. M.; SILVA, V. N. Qualidade fisiológica de sementes de arroz irrigado por aspersão e inundação. In: CONGRESSO DE ARROZ IRRIGADO, 8, 2013, Santa Maria. **Anais...** Porto Alegre: Sosbai, 2013.

HEERMANN, D. F.; DUKE, H. R.; SERAFIM, A. M.; DAWSON, L. J. Distribution functions to represent center-pivot water distribution. **Transactions American Society of Agricultural Engineers**, v. 35, n. 5, p. 1465 - 1472, set./out. 1992.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 11545**. Agricultural irrigation equipment – Centre-pivot and moving lateral irrigation machines with sprayer or sprinkler nozzles – Determination of uniformity of water distribution, 2001.

KAHLLOWN, M. A.; RAOOF, A.; ZUBAIR, M. Water use efficiency and economic feasibility of growing rice and wheat with sprinkler irrigation in the Indus Basin of Pakistan. **Agricultural Water Management**, v. 87, n. 3, p. 292–298, feb. 2007.

KELLER, J.; BLIESNER, R. D. **Sprinkle and Trickle Irrigation**. New York: NY.1990.

LATIF, M.; AHMAD, F. Operational analysis of water application of a sprinkler irrigation system installed in a golf course: case study. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 134, p. 446-453, aug. 2008.

LEITÃO, M. de M. V. B. R., OLIVEIRA, G. M. de; LEITÃO, T. J. V. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evaporação para duas regiões da Paraíba. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.11, n.6, p.585–593, jun. 2007.

MANTOVANI, E. C.; BERNARDO, S.; PALARETTI, L. F. **Irrigação princípios e métodos**. 3. ed. Viçosa, MG: UFV, 2009. 355 p.

MCLEAN, R. K.; SRI RANJAN, R.; KLASSEN, G. Spray Evaporation losses from sprinkler irrigation systems. **Canadian agricultural engineering**, v. 42, n. 1, p. 1.1-1.15, 2000.

MONTERO, J.; TARJUELO, J.M.; CARRIÓN, P. Sprinkler droplet size distribution measured with an optical spectropluviometer. **Irrigation Science**. v. 22, n. 2, p. 47–56, 2003.

MORENO, J.A. **Clima do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Secretaria da Agricultura, 1961. 42p.

OLIVEIRA, L. F. C.; ALVES FILHO, A. S.; SILVEIRA, P. M. Distribuição de água no solo aplicada por um pivô central. **Bioscience Journal**, v. 19, n. 2, p. 79-87, mai./ago. 2003.

OLIVEIRA, H. F. E. de; COLOMBO, A.; FARIA, L. C.; BESKOW, S.; PRADO, G. do. SIA: Modelo para simulação da irrigação por aspersão - Calibração e validação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.17, n.3, p.253-260, jan. 2013.

ORTÍZ, J. N.; TARJUELO, J. M.; JUAN, J. A. Characterization of evaporation and drift losses with centre pivots. **Agricultural Water Management**, v.96, p.1541-1546, jul. 2009.

ORTEGA, J. F.; TARJUELO, J. M.; JUAN, J. A de. Discharge Efficiency in Sprinkling Irrigation: Analysis of the Evaporation and Drift Losses in Semi-arid Areas. **Agricultural Engineering International**, Saint Joseph, v.2, p.1-21, 2000.

MAPA. **Projeções do Agronegócio: Brasil 2012/13 a 2022/23 Projeções de Longo Prazo**. Disponível em:
http://www.agricultura.gov.br/arq_editor/projecoes%20%20versao%20atualizada.pdf Acesso em: 28 de mai. de 2015.

PARFITT, J. M. B.; BRETANHA, G.; MATTOS, G. S. de; PINTO, M. A. B.; THEISEN, G. SCIVITTARO, W. B. Comportamento do arroz irrigado por aspersão em diferentes sistemas de produção no RS. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ARROZ IRRIGADO, 8., 2013, Santa Maria. **Anais...** Porto Alegre: Sosbai, 2013.

PINTO, J. M.; SILVA, C. L. da; OLIVEIRA, C. A. da. Influência de variáveis climáticas e hidráulicas no desempenho da irrigação de um pivô central no oeste baiano. **Engenharia Agrícola**, v. 26, n. 1, p. 76-85, jan./abr. 2006.

PLAYÁN, E.; GARRIDO, S.; FACI, J.M.; GALÁN, A. Characterizing pivot sprinklers using an experimental irrigation machine. **Agricultural Water Management**, v. 70, p. 177-193, jun. 2004.

PLAYÁN, E.; SALVADOR, R.; FACI, J.M.; ZAPATA, N.; MARTÍNEZ-COB, A.; SÁNCHEZ, I. Day and night wind drift and evaporation losses in sprinkler solid-sets and moving laterals. **Agricultural Water Management**, v. 76, p. 139 – 159, feb. 2005.

ALNAIZY, R. SIMONET, D. Analysis of water evaporation and drift losses during irrigation in semi-arid areas of Sharjah (UAE) and Riyadh (KSA). **Natural Resources Research**, v. 21, n. 2, jun. 2012.

ROCHA, E. M. de M.; COSTA, R. N. T.; MAPURANGA, S. M. da S.; CASTRO P. T. Uniformidade de distribuição de água por aspersão convencional na superfície do perfil do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.3, n.2, p.154-160, 1999.

SANCHEZ, I.; FACI, J. M.; ZAPATA, N. The effects of pressure, nozzle diameter and meteorological conditions on the performance of agricultural impact sprinklers. **Agricultural Water Management**, v. 102, p. 13 -24, nov. 2011.

SANDRI, D.; CORTEZ, D. de A. Parâmetros de desempenho de dezesseis equipamentos de irrigação por pivô central. **Ciência Agrotecnologia**, Lavras, v. 33, n. 1, p. 271-278, 2009.

SMAJSTRLA, A.G.; ZAZUETA, F.S. **Evaporation loss during sprinkler irrigation**. Gainesville: Agricultural and Biological Engineering Department, 2003. 8 p.

STAMBOULI, T.; MARTÍNEZ-COB, A.; FACI, J. M.; HOWELL, T.; ZAPATA, N. Sprinkler evaporation losses in alfalfa during solid-set sprinkler irrigation in semiarid areas. **Irrigation Science**, 31, p. 1075-1089, set. 2013.

TARJUELO, J. M. M.; GÓMEZ, M. V.; PARDO, J. L. Working conditions of sprinkler to optimize application of water. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, p. 895-913, nov/dez. 1992.

TARJUELO, J. M.; ORTEGA, J. F.; MONTERO, J.; JUAN, J. A. Modeling evaporation and drift losses in irrigation with medium size impact sprinklers under semi-arid conditions. **Agricultural Water Management**, v.43, p. 263-284, jul. 2000.

TARJUELO, J. M. M. **El Riego por Aspersión y su Tecnología**. Madrid: Mundi-Prensa, 2005. 581 p.

TOPAK, R.; SÜHERİ, S.; ÇİFTÇİ, N.; AÇAR, B. Performance evaluation of sprinkler irrigation in a semi-arid area. **Pakistan Journal of Biological Sciences**, New York, v.8, n.1, p. 97-103, 2005.

TOROMO, A. K.; KIPKORIR, E.C.; SHITOTE S. M.; KIBIIY, J. K. Can shelterbelts improve sprinkler irrigation performance under windy semi arid conditions?, **Irrigation and Drainage Systems**, v. 25, p. 335–345, mar. 2011.

VIEIRA, E. **Proposta de Zoneamento Ambiental para o município de Capão do Leão**. 2004. 99 f. Dissertação (Mestrado em Geografia), Departamento de Geociências, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

WRACHIEN, D. de.; LORENZINI, G. Modelling jet flow and losses in sprinkler irrigation: overview and perspective of a new approach. **Biosystems Engineering**, v. 94, n. 2, p. 297–309, may. 2006.

YACOUBI, S.; ZAYANI, K.; ZAPATA, N.; ZAIRI, A.; SLATNI, A.; SALVADOR, R.; PLAYÁN, E. Day and night time sprinkler irrigated tomato: irrigation performance and crop yield. **Biosystems Engineering**, v. 107, p. 25-35, jul. 2010.

YAZAR, A. Evaporation and drift losses from sprinkler irrigation systems under various operating conditions. **Agricultural Water Management**, v. 8, p. 439 – 449, may. 1984.